



**You have downloaded a document from
RE-BUS
repository of the University of Silesia in Katowice**

Title: Analiza i poprawa jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych

Author: Łukasz Więclaw

Citation style: Więclaw Łukasz. (2012). Analiza i poprawa jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych. Praca doktorska. Katowice : Uniwersytet Śląski

© Korzystanie z tego materiału jest możliwe zgodnie z właściwymi przepisami o dozwolonym użytku lub o innych wyjątkach przewidzianych w przepisach prawa, a korzystanie w szerszym zakresie wymaga uzyskania zgody uprawnionego.



UNIwersYTET ŚLĄSKI
W KATOWICACH



Biblioteka
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

Uniwersytet Śląski
Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach
Instytut Informatyki

Rozprawa doktorska

**ANALIZA I POPRAWA JAKOŚCI CYFROWYCH
OBRAZÓW LINII PAPILARNYCH**

Łukasz Więclaw

Promotor: prof. UŚ dr hab. Piotr Porwik

Sosnowiec 2012

Praca zrealizowana w ramach grantu promotorskiego MNISW N N519 574038

Spis treści

Spis treści	i
1 Wstęp	2
1.1 Cel pracy	6
1.2 Teza pracy	6
1.3 Układ pracy	6
2 Daktyloskopia	7
2.1 Podstawowe pojęcia biometrii	8
2.2 Biometryczne cechy linii papilarnych	11
2.3 Pomiar cech linii papilarnych	14
2.3.1 Minucje	15
2.3.2 Obraz kierunków	15
2.3.3 Częstość występowania listewek skórnych	17
2.4 Jakość obrazu linii papilarnych	19
2.5 Podobieństwo obrazów linii papilarnych	20
2.6 Systemy identyfikacji daktyloskopijnej	22
3 Przegląd literatury	27
3.1 Metody normalizacji obrazu linii papilarnych	27
3.2 Metody wyznaczania obrazu kierunków listewek skórnych	28
3.3 Metody wyznaczania częstości występowania listewek skórnych	30
3.4 Metody wyodrębniania tła obrazu	31
3.5 Metody poprawy jakości rysunku listewek skórnych	32
3.6 Metody lokalizacji cech	33

4	Analiza i poprawa jakości obrazów linii papilarnych	35
4.1	Normalizacja obrazu linii papilarnych	35
4.2	Obraz kierunków wyznaczany metodą maski wzorców	37
4.3	Filtracja anizotropowa	43
4.4	Obraz kierunków wyznaczany metodą gradientową	45
4.5	Wyznaczanie częstości występowania listewek skórnych	51
4.6	Segmentacja obrazu linii papilarnych	55
4.7	Binaryzacja obrazu linii papilarnych	59
4.8	Lokalizacja minucji	64
5	Wyniki eksperymentów	73
5.1	Wprowadzenie	73
5.2	Charakterystyka badanego zbioru obrazów	74
5.3	Wyniki badań	76
5.4	Wyznaczanie częstości występowania oraz kierunku linii papilarnych	87
5.4.1	Dobór parametrów algorytmów metody QEMD	87
5.4.2	Badania kąta nachylenia listewek skórnych	90
5.4.3	Badania częstości występowania listewek skórnych	93
6	Podsumowanie	98
	Bibliografia	102
A	Wykonane oprogramowanie	113
	Spis symboli i skrótów	119

Przedmowa

Wsparcie, które otrzymałem od wielu osób w ciągu ostatnich kilku lat pozwoliło mi na podjęcie i realizację moich prac naukowo-badawczych. Owocem tych prac jest niniejsza rozprawa.

Nie sposób wymienić wszystkie osoby, które w najróżniejszy sposób przyczyniły się do powstania niniejszej pracy. Dziękuję im wszystkim.

Swoje szczególne podziękowania pragnę złożyć promotorowi pracy Panu Prof. Piotrowi Porwikowi za zainspirowanie mnie do podjęcia badań naukowych oraz za poświęcony czas, wyrozumiałość oraz trud, bez którego niniejsza rozprawa by nie powstała.

Pragnę podziękować wszystkim osobom z Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego w Warszawie za poświęcony czas oraz zaangażowanie w badania. Przede wszystkim pragnę podziękować Panu mł. insp. Krzysztofowi Tomaszyciemu oraz Pani Magdalenie Kośmider, bez których badania przeprowadzone na potrzeby niniejszej dysertacji nie mogłyby powstać.

Szczerze dziękuję także moim kolegom z Zakładu Systemów Komputerowych za pomoc, inspiracje i wsparcie nie tylko naukowe.

Szczególne podziękowania składam wszystkim najbliższym mi osobom, a przede wszystkim rodzinie, bez której nie dałbym rady podjąć wysiłku ostatnich lat.

Meszna, 2012 roku.

Rozdział 1

Wstęp

Określanie tożsamości staje się powoli elementem funkcjonowania współczesnych społeczeństw. Oznacza to, że wzrasta zapotrzebowanie w wielu dziedzinach życia na wiarygodne i coraz lepsze metody rozpoznawania osób: w kryminalistyce, systemach kontroli granicznej, ochronie pomieszczeń, itp.

W ostatnich latach coraz większą popularność zyskują systemy oparte na technikach biometrycznych. Wynika to z faktu, że cechy biometryczne są w wielu przypadkach unikalne i trudne do sfałszowania. Rejestracja cech biometrycznych jest znana od dawna, ale jej praktyczne, naukowo dowiedzione walory sięgają początków XIX wieku [16, 50]. Obecnie techniki biometryczne są z powodzeniem stosowane w dziedzinach automatycznego rozpoznawania i wnioskowania, zarówno w obszarach komercyjnych jak i kryminalistyce.

Rosnące zagrożenie przestępczością elektroniczną powoduje, że procedury autoryzacji i protokoły uwierzytelniania użytkownika prowadzone technikami biometrycznymi, często stają się integralnymi elementami współczesnych systemów zabezpieczeń. Rozwiązania takie stosowane są między innymi w systemach kontroli dostępu do danych i zasobów sieci komputerowych, w bankach lub systemach kontroli czasu pracy. Rosnące znaczenie ochrony zasobów sprawia, że nakłady finansowe przeznaczane na tego typu badania są stale zwiększane [3]. Również nowoczesne, mechaniczne i chemiczne, metody odkrywania i rejestracji śladów kryminalnych (w tym odcisków linii papilarnych) wymuszają poszukiwanie nowych, bardziej dokładnych i zarazem wiarygodnych metod rozpoznawania i klasyfikacji takich śladów.

Metody biometryczne bazują na analizie unikalnych cech człowieka, opisujących fizyczną budowę, kształt ciała (cechy fizyczne - biologiczne) lub zachowania osoby (cechy behawioralne). Opis podstawowych cech biometrycznych przedstawiono w Rozdziale 2.1.

Wśród szeroko stosowanych technik biometrycznych (np. rozpoznawanie tęczy oka, głosu, zapachu, analiza DNA, itp.) szczególne miejsce zajmuje nauka o analizie i porównywaniu cech linii papilarnych człowieka nazwana daktyloskopia. Daktyloskopia może być zaliczona do technik analizy obrazów, a jej szczególna przydatność uwidacznia się w kryminalistyce [2, 58, 92]. Początki daktyloskopii sięgają końca XIX wieku i do niedawna była ona kojarzona tylko ze zwalczaniem przestępczości. Obecnie, dzięki nowym wyzwaniom społeczeństwa informacyjnego, techniki daktyloskopijne są także wykorzystywane w wielu innych obszarach, np. kontroli granicznej lub komercyjnych systemach ograniczania dostępu do pomieszczeń i zasobów sieciowych. Najlepszym przykładem takich działań jest porozumienie zawarte w roku 1985 w Schengen, którego sygnatariuszem jest między innymi Polska. Konsekwencją tego porozumienia jest zniesienie kontroli osób przekraczających granice między państwami członkowskimi układu. Wymaga to jednak nowej strategii państw w zakresie bezpieczeństwa wewnętrznego, czego wynikiem są między innymi wprowadzone przez Polskę paszporty biometryczne.

Dzięki nowym algorytmom oraz urządzeniom rejestracji danych można budować systemy biometryczne charakteryzujące się dużą szybkością działania oraz wysoką skutecznością rozpoznawania [57]. Jednakże, ze względu na szczególny charakter policyjnych systemów ewidencjonowania i przetwarzania śladów daktyloskopijnych, analiza obrazów śladów kryminalnych nie jest w pełni zautomatyzowana. Możliwość popełnienia pomyłek przez systemy klasyfikujące powoduje, że ich praca musi być nadzorowana przez człowieka [54].

Obecnie stosowane systemy identyfikacji daktyloskopijnej wykorzystują algorytmy wyznaczania punktów charakterystycznych (tzw. *minucji*) oraz klasyfikacji struktur linii papilarnych. Automatyczna ekstrakcja tych cech z cyfrowego obrazu jest zadaniem trudnym, a wydajność stosowanych obecnie technik jest silnie uzależniona od jakości obrazu linii papilarnych identyfikowanej osoby [58]. Ze względu na zróżnicowanie źródeł akwizycji obrazu, technik pobierania próbek śladów oraz mogące występować osobnicze dermatozy i uszkodzenia skóry, jakość obrazów linii papilarnych tej samej osoby może być znacząco odmienna w różnych odstępach czasu.

Dynamika śladów pozostawionych na miejscach przestępstw oraz różnorodność podłoża, na którym zostały one ujawnione powodują, że część obrazów daktyloskopijnych wymaga od laborantów dodatkowej, czasochłonnej, chemicznej i graficznej obróbki, w trakcie której niewidoczny wcześniej obraz źródłowy jest ujawniany i rejestrowany. Po obróbce wstępnej, obraz przekazywany jest policyjnemu ekspertowi daktyloskopii. Jedynie obrazy najwyższej jakości, np. pochodzące z kart identyfikacyjnych daktyloskopowanych osób, mogą być bezpośrednio przekazywane ekspertowi.

Praca częściowo zautomatyzowanych systemów daktyloskopijnych jest możliwa wtedy, gdy obrazy wejściowe nie zawierają artefaktów i są wysokiej jakości, czego z reguły nie można zapewnić w przypadku obrazów śladów kryminalistycznych pochodzących z miejsc przestępstw. Obrazy takie muszą zostać poddane wstępnemu procesowi tzw. wzmacniania i ręcznego wyznaczania minucji. Czynności te są pracochłonne i wykonuje je policyjny ekspert. Metoda ręcznego wyznaczania minucji nie jest pozbawiona wad. Jest to proces żmudny, gdzie również istnieje możliwość popełniania pomyłek. Z tego powodu wiele śladów nie może być kierowanych bezpośrednio do systemu automatycznej identyfikacji osób (AFIS - ang. *Automated Fingerprint Identification System*). W takim przypadku dane nie są umieszczane w bazach systemu AFIS, oczekując na ich odpowiednie przetworzenie. Brak wpisu w bazie danych nie pozwala również na przeprowadzanie kompleksowych, bardzo ważnych badań przesiewowych, skracających czas wykrycia przestępcy. Jest to zjawisko zdecydowanie niekorzystne. Z tych powodów istnieje potrzeba, artykułowana wymogami służb policyjnych, opracowania lepszych metod, pozwalających na poprawę wyników rozpoznawania obrazów systemów AFIS [111].

Znanych jest wiele opracowań opisujących sposoby poprawy jakości obrazów linii papilarnych. Poprawa jakości obrazów jest przede wszystkim stosowna w systemach komercyjnych, które wymagają aby obraz posiadał jednolitą charakterystykę tła (teksturę), co nie jest trudne do spełnienia w stabilnych warunkach akwizycji [51, 52, 58, 113, 133]. W praktyce kryminalistycznej ślady daktyloskopijne ujawniane są różnymi technikami zależnymi od podłoża, na którym znajduje się ślad. Powoduje to, że wymóg jednolitego tła nie jest zachowany, co utrudnia automatyczne wyodrębnienie niezbędnych cech z obrazu.

W przypadku obrazów niskiej jakości niektóre cechy biometryczne nie mogą być prawidłowo ustalone lub mogą być ustalane błędnie.

Rozprawa doktorska koncentruje się na opracowaniu metody analizy i po-

prawy jakości obrazów linii papilarnych, które uwzględniają charakter obrazów śladów kryminalistycznych (obrazów linii papilarnych pochodzących z miejsca przestępstw). Jest to zadanie trudne w realizacji w przeciwieństwie do mniej restrykcyjnych, komercyjnych systemów identyfikacji biometrycznej. Obrazy śladów kryminalistycznych często mają zbyt niską jakość aby mogły być przetwarzane w systemach automatycznego wnioskowania. Z tego względu, w opisywanym w pracy rozwiązaniu, przeprowadzona została dedykowana poprawa jakości obrazu śladu kryminalistycznego w celu wykonania skutecznej analizy cech linii papilarnych - co opisane będzie w następnych rozdziałach. W pracy zaprezentowane zostały również autorskie metody normalizacji obrazu, wyznaczania kąta nachylenia i częstości występowania listewek skórnych oraz binaryzacji lokalnej.

Jednym z założonych celów autora jest wprowadzenie do praktyki opracowanych metod. co powinno ułatwić pracę laboranta pracowni wizualizacji śladów oraz policyjnego eksperta daktyloskopii obsługującego stanowisko robocze systemu AFIS. Rozwiązania te pozwolą również na skrócenie czasu identyfikacji osób. Opracowane na potrzeby rozprawy rozwiązania pozwoliły na wdrożenie pomocniczego oprogramowania w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym przy Komendzie Głównej Policji w Warszawie. Zaproponowane w rozprawie rozwiązania mogą być również stosowane w komercyjnych systemach biometrycznej identyfikacji lub weryfikacji osób.

Jednym z założonych celów autora jest wprowadzenie do praktyki opracowanych metod. Powinno to ułatwić pracę laboranta pracowni wizualizacji śladów oraz policyjnego eksperta daktyloskopii obsługującego stanowisko robocze systemu AFIS. Rozwiązania te pozwolą również na skrócenie czasu identyfikacji osób. Opracowane na potrzeby rozprawy rozwiązania pozwoliły na wdrożenie pomocniczego oprogramowania w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym przy Komendzie Głównej Policji w Warszawie. Opis wykonanego oprogramowania zamieszczony został w Dodatku A.

Zaproponowane w rozprawie rozwiązania mogą być również stosowane w komercyjnych systemach biometrycznej identyfikacji lub weryfikacji osób.

1.1 Cel pracy

Celem pracy było opracowanie metody analizy obrazów linii papilarnych niskiej jakości oraz zbadanie wpływu poprawy jakości takich obrazów na wyniki automatycznej lokalizacji indywidualnych cech listewek skórnych tzw. *minucji*. Należy opracować metodę poprawy jakości obrazów śladów kryminalistycznych linii papilarnych zarejestrowanych w postaci cyfrowej. Należy opracować metody analizy przebiegu kierunków nachylenia listewek skórnych, częstości ich występowania na obrazie linii papilarnych oraz lokalizacji indywidualnych cech listewek skórnych.

1.2 Teza pracy

Automatyczna analiza kierunków nachylenia listewek skórnych oraz częstości ich występowania pozwala na zastosowanie filtracji anizotropowej oraz specjalizowanej binaryzacji lokalnej. Metody te wykorzystane w celu poprawienia jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych, umożliwiają zmniejszenie liczby nieprawidłowo wyznaczonych, w trybie automatycznym, tzw. *minucji fałszywych*.

1.3 Układ pracy

Niniejsza praca składa się z 6 rozdziałów. W rozdziale pierwszym scharakteryzowano problematykę badawczą oraz przedstawiono cele i tezę rozprawy. W rozdziale drugim szczegółowo omówiono zagadnienia związane z daktyloskopią i systemami AFIS. W rozdziale trzecim dokonano przeglądu istniejących metod analizy cech listewek skórnych oraz poprawy jakości obrazów linii papilarnych. W rozdziale czwartym przedstawiono autorską metodę poprawy jakości oraz lokalizacji indywidualnych cech listewek skórnych. W rozdziale piątym zaprezentowano ocenę skuteczności przedstawionej metody oraz wyniki badań etapów analizy obrazów linii papilarnych. Pracę kończy dodatek zawierający opis oprogramowania wdrożonego w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Policji w Warszawie.

Rozdział 2

Daktyloskopia

Przyjmuje się, że daktyloskopia zajmuje się metodami identyfikowania człowieka na podstawie analizy linii papilarnych, czyli listewek skórnych znajdujących się na wewnętrznych powierzchniach palców, dłoni oraz na dolnych powierzchniach stóp [46].

Nazwa *daktyloskopia* ustaliła się pod koniec XIX w. Jej etymologia wywodzi się z języka greckiego i oznacza „obserwację palców” (*daktylos* - palec, *skopein* - patrzeć, obserwować) [1]. Daktyloskopia jest jedną z wielu dostępnych współcześnie technik biometrycznych.

Biometria (z greckiego *bios* - życie, *metron* - miara) jest nauką zajmującą się metodami rozpoznawania osób na podstawie analizy unikalnych fizycznych lub behawioralnych cech człowieka.

Pierwszym praktycznie stosowanym systemem biometrycznym był system opracowany przez A. Bertillona [16]. Dokonując pomiarów antropometrycznych odkrył on, że kształt i wielkość ludzkiego szkieletu po 25 roku życia pozostają bez zmian. System Bertillona był popularny w wielu krajach i stosowany w kryminalistyce w latach 1879-1905. Popularność systemu Bertillona wywodziła się z braku innych metod identyfikacji. W 1903 r. po głośnym incydencie w Leavenworth [92], gdzie system Bertillona zawiódł, został on wycofany i zastąpiony znanymi już procedurami daktyloskopowania.

Prekursorem daktyloskopii był W. J. Herschel, który zauważył, że linie papilarne każdego człowieka cechuje niepowtarzalność [50]. Udoskonalona technika daktyloskopowania, znana jako system Galtona-Henry’ego, została wprowadzona

do praktyki przez Scotland Yard w roku 1901 [35]. W metodzie tej, której skomputeryzowana wersja jest stosowana także współcześnie, odciski palców klasyfikowane był w trójetapowym procesie analizy: po kształtach i konturach wzorów linii papilarnych, po pozycji typów wzorów na palcu oraz po względnym rozmiarze linii wyznaczonym przez liczbę bruzd [48].

2.1 Podstawowe pojęcia biometrii

W biometrii, rozpoznawanie osób odbywa się na podstawie różnych, osobniczych cech człowieka.

Definicja 2.1. Cechy osobnicze (biometryczne) są właściwościami motorycznymi, fizjologicznymi, morfologicznymi lub psychicznymi, unikalnie charakteryzującymi każdego człowieka.

Cechy biometryczne można podzielić na dwie kategorie:

1. Cechy statyczne - fizyczno-biologiczne (opisujące miarę pewnej fizycznej cechy człowieka):
 - kształt i rozmieszczenie linii papilarnych,
 - geometria dłoni, ucha, twarzy, czerwieni wargowej,
 - kod DNA człowieka,
 - układ żył (np. dłoni lub nadgarstka),
 - obraz tęczówki i siatkówki oka,
 - zapach.
2. Cechy dynamiczne - behawioralne (związane z zachowaniem osoby):
 - parametry traktu głosowego i mowy ciągłej,
 - dynamika podpisu odręcznego,
 - dynamika uderzania w klawisze klawiatury,
 - charakterystyka chodu,
 - ruch ust.

System biometryczny jest systemem klasyfikującym dane. Jest to więc klasyczne zadanie rozpoznawania obiektów na podstawie dostępnego zbioru cech opisujących obiekt lub na podstawie sekwencji takich zbiorów.

Definicja 2.2. Klasyfikacja ψ jest procesem podejmowania decyzji, na podstawie której następuje przyporządkowanie nieznanego obiektu ϖ , opisanego zbiorem cech $V_{\varpi} = \{\nu_{\varpi}^1, \dots, \nu_{\varpi}^k\}$, do jednej z klas π_j , $j = 1, 2, \dots, K$, gdzie:

K - jest liczbą dopuszczanych klas.

Ze względów praktycznych zbiór cech można przedstawić w postaci wektora. Tym sposobem zapisy $V_{\varpi} = \{\nu_{\varpi}^1, \dots, \nu_{\varpi}^k\}$ oraz $\nu^{\varpi} = [\nu_1^{\varpi}, \dots, \nu_k^{\varpi}]$ są równoważne. Zabieg ten pozwala na rozwiązywanie zadań rozpoznawania obiektów w liniowych przestrzeniach euklidesowych E^k , a więc w przestrzeniach z iloczynem skalarnym i ustaloną metryką.

Ze względu na możliwość zmian cech biometrycznych oraz niestabilne warunki akwizycji danych, zebrane w różnych odstępach czasu cechy biometryczne mogą się znacząco różnić. Z tego względu zadanie klasyfikacji nie jest zadaniem trywialnym.

Na podstawie przyjętej *a priori* miary podobieństwa S system biometryczny rozpoznaje badaną osobę jako intruza (ang. *impostor* - osobę nieuprawnioną, oszusta) lub jako osobę prawowitą (ang. *genuine* - osobę uprawnioną, autentyczną).

Dla dwóch klas decyzyjnych π_1 oraz π_2 klasyfikacja odbywa się na podstawie przyjętego współczynnika podobieństwa S wektorów cech ν^i oraz ν^{ϖ} , obiektów i oraz ϖ , względem ustalonego progu podobieństwa T , według następującej reguły decyzyjnej:

$$\nu^i = \begin{cases} \pi_1 & \text{gdy } S(\nu^i, \nu^{\varpi}) \geq T \\ \pi_2 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.1)$$

Zgodnie z zależnością 2.1 wartość dominującej funkcji dyskryminującej musi być większa od założonej wartości progowej T . Ustalenie wartości progu T jest bardzo ważne i wpływa na wyniki klasyfikacji. Kryterium (2.1) może być spełnione dla wielu obiektów opisanych wektorami cech ν^i , $i = 1, 2, \dots, n$. W takim przypadku system klasyfikujący zwraca listę kandydatów $C = \{\nu^1, \nu^2, \dots, \nu^n\}$. Z tego względu może wyniknąć potrzeba zmiany progu T lub potrzeba zastosowania dodatkowej biometryki, celem zredukowania listy kandydatów do pojedynczego trafienia.

Jeśli system biometryczny pracuje w reżimie automatycznym, można wyróżnić dwa tryby pracy takiego systemu [57]:

- tryb weryfikacji - następuje sprawdzenie czy dany zbiór cech należy do tożsamości zarejestrowanej w bazie danych,
- tryb identyfikacji - następuje ustalenie tożsamości dysponenta danego zbioru cech.

Definicja 2.3. Weryfikacja (ang. *verification*) - jest procesem jednokrotnego porównania wektora cech ν_L^ϖ obiektu ϖ , opisanego jawnym deskryptorem L , z wzorcowym wektorem cech ν_L^μ przechowywanym w bazie danych w rekordzie o numerze L . Przyjmuje się, że obiekty są podobne (należą do tej samej klasy) jeżeli przyjęta miara podobieństwa S jest większa (równa) od przyjętego progu podobieństwa T :

$$S(\nu_L^\varpi, \nu_L^\mu) \geq T \Rightarrow \{\nu_L^\varpi, \nu_L^\mu\} \in \pi_1 \quad (2.2)$$

Definicja 2.4. Identyfikacja (ang. *identification*) - jest procesem sukcesywnego porównywania wektora cech ν^ϖ obiektu ϖ z wszystkimi wektorami cech ν^j , $j = 1, \dots, d$ obiektów przechowywanymi w d rekordowej bazie danych. Obiekty są podobne, jeżeli ich miara podobieństwa S jest większa lub równa od przyjętego progu podobieństwa T . W takim przypadku:

$$\{\nu^j : S(\nu^\varpi, \nu^j) \geq T, j = 1, \dots, d\} \in \pi_1 \quad (2.3)$$

Niektóre systemy biometryczne wymagają, aby w procesie identyfikacji został wskazany tylko jeden obiekt x opisany wektorem ν^x , najbardziej podobny do wektora ν^ϖ . W takim przypadku:

$$\{\nu^x : S(\nu^\varpi, \nu^j) = a, j = 1, \dots, d\} \in \pi_1 \quad (2.4)$$

gdzie:

$$a = \max_{j=1, \dots, d} \{S(\nu^\varpi, \nu^j) \geq T\} \quad (2.5)$$

Każda z wymienionych w Definicji 2.1 cech może być wykorzystana jako indywidualny identyfikator biometryczny osoby. W praktyce, skuteczność rozpoznawania można poprawić stosując tzw. techniki fuzji, gdzie analizowane są równocześnie różne możliwe do zmierzenia cechy biometryczne (np. głos, tęczęwka, oka, podpis, itp.). Tematyka ta nie jest jednak poruszana w pracy.

2.2 Biometryczne cechy linii papilarnych

W 1879 roku, przebywający w Japonii brytyjski chirurg H. Faulds po raz pierwszy na świecie wykorzystał daktyloskopię w celu identyfikacji osoby. Na podstawie pozostawionych na szklanej butli śladów linii papilarnych, wskazał on złodzieja szpitalnego spirytusu [34, 82].

Powstanie i późniejszy rozwój daktyloskopii przypisuje się jednak F. Galtonowi [43] (który był *notabene* kuzynem Karola Darwina). W pracy „*Finger Prints*” Galton przedstawił naukowe podstawy daktyloskopii oraz sformułował uznawaną do dzisiaj tzw. regułę „3N”: niezmiennosc, niezniszczalność oraz niepowtarzalność wzoru linii papilarnych [38].

Na podstawie licznych badań i obserwacji stwierdzono, że listewki skórne palca zaczynają się tworzyć między 100, a 120 dniem życia płodu, natomiast wyraźnie ukształtowane są już w szóstym miesiącu ciąży i od tej pory ich układ, rozmieszczenie i cechy budowy pozostają bez zmian [42].

Uszkodzenie naskórka (mechaniczne, chemiczne, lub spowodowane schorzeniami) nie pociąga za sobą trwałego zniszczenia wzoru listewek skórnych i ich cech osobniczych. Po upływie określonego czasu od ustania działania szkodliwych czynników (od 10 do 15 dni), następuje naturalna regeneracja naskórka i listewek skórnych (*restitutio ad integrum*) [42]. Trwałe uszkodzenia mogą powstać w wyniku odparzeń lub odmrożeń III lub IV stopnia oraz w wyniku głębokiego skaleczenia. Jednakże blizny, podobnie jak listewki skórne, zachowują indywidualny rysunek, nadal umożliwiając skuteczną identyfikację osoby [9]. Jednostajna praca fizyczna w połączeniu z czynnikami mechanicznymi lub chemicznymi może wywołać różnego rodzaju dermatozy w postaci zgrubień, zmian lub pęknięć naskórka. Z chwilą ustania szkodliwych warunków pracy, warstwy naskórka regenerują się i układ listewek skórnych staje się znowu prawidłowy [43].

Wzór listewek skórnych na palcach, dłoniach i stopach jest zindywidualizowany. Nawet linie papilarne bliźniąt jednojajowych zawierają przekonująco dużą liczbę cech indywidualnych, pozwalających na ich odróżnienie [96].

Według szacunków Galtona prawdopodobieństwo powtórzenia się układu wszystkich minucji na dwóch odciskach tego samego palca różnych osób wynosi ok. $1,45 \times 10^{-11}$ [38]. Najnowsze badania D. Stoney'a dowodzą, że prawdopodobieństwo uzyskania dwóch obrazów linii papilarnych, na których układ, ukie-runkowanie oraz liczba listewek skórnych będą takie same wynosi w przybliżeniu $1,2 \times 10^{-80}$ [110].

W 1918 r. E. Locard wykazał, że do jednoznacznej identyfikacji osoby wystarczy 12 punktów (*detali Galtona*) tego samego palca [23].

W systemie Galtona-Henry'ego, o którym była już mowa, zdefiniowano poję-cia pierwotne, które do dzisiaj są stosowane w daktyloskopii (Rys. 2.1):

- *Termin wewnętrzny* - to punkt w centrum wzoru odcisku, który wskazuje miejsce największej krzywizny linii papilarnych (kolor czerwony).
- *Delta* - utworzona z dwóch równoległych linii, rozchylających się w pewnym punkcie w kształt odwróconego lejka, ograniczonych od dołu linią (kolor zielony).
- *Linia Galtona* - łączy *deltę* oraz *termin wewnętrzny* (czerwono-zielona li-nia). Liczba linii oraz ich nachylenie jest wykorzystywane w uznawanej do dziś klasyfikacji Galtona-Henry'ego [48].
- *Pory* - ekrynowe gruczoły potowe (kolor żółty).
- *Minucje* - indywidualne cechy listewek skórnych (kolor niebieski). Należą do nich: początki, zakończenia, rozwidlenia, złączenia, oczka, haczyki, mostki, punkty, odcinki itp., które wykorzystywane są w identyfikacji tożsamości osoby.

Struktura globalna, czyli kierunek zmian linii papilarnych oraz umiejscowienie *terminu wewnętrznego* i *delt*, nie są unikalne, utrudniają więc zbudowanie wiary-godnego klasyfikatora. Na liniach papilarnych można jednak wskazać opisywane już minucje, które tworzą unikalny dla każdej osoby układ (różna orientacja, kształt i skupienie). Liczba oraz rozkład minucji są podstawą biometryki opartej na analizie wzorów linii papilarnych.



Rysunek 2.1: Cechy charakteryzujące odcisk linii papilarnych.

Obecnie w Polsce używa się ujednoliconej klasyfikacji minucji opracowanej przez Cz. Grzeszyka [41]. Ustalił on również częstość występowania poszczególnych typów minucji na palcach i dłoni ręki prawej i lewej, w zależności od płci oraz typu wzoru linii papilarnych. W proponowanej przez niego klasyfikacji wyróżnia się 21 (17 odrębnych) typów minucji:

1. Początek / Koniec (*Initium / Terminatio*)
2. Rozwidlenie / Złączenie (*Bifurcatio / Iunctio*)
3. Rozwidlenie / Złączenie podwójne (*duplex B / I*)
4. Rozwidlenie / Złączenie potrójne (*triplex B / I*)
5. Haczyk (*Unculus*)
6. Oczko (*Ocellus*)



7. Oczko podwójne (*Ocellus duplex*)
8. Mostek (*Ponticulus*)
9. Mostek bliźniaczy (*Ponticulus duplex*)
10. Punkt (*Punctum*)
11. Odcinek (*Segmentum*)
12. Styk boczny (*Iunctura lateralis*)
13. Linia przechodząca (*Linea intermittens*)
14. Skrzyżowanie (*Decussatio*)
15. Trójnóg (*Tripus*)
16. Linia szczątkowa (*Linea rudimentalis*)
17. Minucja typu M (*Minutia M formis*)



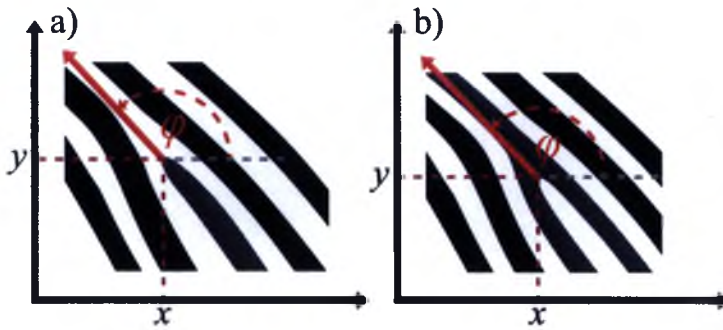
2.3 Pomiar cech linii papilarnych

W automatycznych systemach identyfikacji daktyloskopijnej (AFIS) analizowane są tylko dwa podstawowe typy minucji: rozwidlenia (tzw. *minucja czarna*) oraz zakończenia (tzw. *minucja biała*) [72].

Dodatkowo, w komputerowych systemach analizy obrazów linii papilarnych wykorzystuje się pomocnicze cechy informujące o przebiegu linii papilarnych. Są to lokalny kąt nachylenia (ukierunkowanie) oraz częstość występowania listewek skórnych (odległość pomiędzy listewkami).

2.3.1 Minucje

Amerykański Narodowy Instytut Standaryzacji (ANSI-NIST) opracował zasady, według których minucje powinny być reprezentowane w bazach danych [7]. Zasady te podlegają normom opisanym w standardzie ISO [55]. W standardzie tym każda minucja opisana jest współrzędnymi pikselowymi obrazu (x, y) oraz kątem orientacji φ . Kąt orientacji φ jest kątem zawartym pomiędzy średnim kierunkiem nachylenia sąsiadujących z minucją listewek skórnych, a dodatnią osią OX . Zasadę oznaczania parametrów minucji, dla różnych jej typów, przedstawiono na Rys. 2.2.



Rysunek 2.2: a) Minucja typu zakończenie, b) minucja typu rozwidlenie. (x, y) - współrzędne minucji na obrazie, φ - kąt orientacji minucji względem osi OX .

Definicja 2.5. Minucja m_i obiektu ϖ w punkcie i opisana jest trójką liczb:

$$m_i^{\varpi} = [x_i^{\varpi}, y_i^{\varpi}, \varphi_i^{\varpi}] \quad (2.6)$$

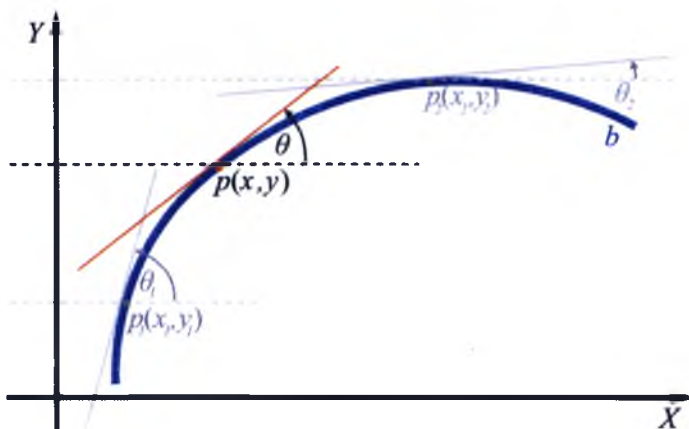
gdzie:

- x_i, y_i - bieżące współrzędne pikselowe i -tej minucji obiektu ϖ ,
- φ_i - kąt orientacji minucji,
- i - bieżący numer analizowanej minucji, $i = 1, \dots, a$,
- a - liczba wszystkich wyodrębnionych minucji obiektu ϖ .

2.3.2 Obraz kierunków

Definicja 2.6. Lokalnym kierunkiem listewki skórnej (lub bruzdy) b w punkcie $p(x, y)$ jest kąt θ zawarty między styczną do krzywej b w punkcie p , a dodatnią osią OX .

Dla uniknięcia nieścisłości przyjęto, że zakresem zmienności kąta θ jest przedział $[0, \pi)$. Przykładowe lokalne kierunki listewki skórnej pokazano na Rys. 2.3.



Rysunek 2.3: Lokalny kąt θ nachylenia listewki skórnej b do osi OX w punkcie p o współrzędnych x, y .

W praktyce lokalny kąt $\theta(x, y)$ wyznaczany może być różnymi sposobami, o czym będzie mowa w dalszej części rozprawy.

Zbiór Ω lokalnych kierunków listewek skórných i bruzd jest zbiorem wartości wyznaczonych dla każdego punktu $p(x, y)$ obrazu I , $x = 1, \dots, N$, $y = 1, \dots, M$. Moc tego zbioru wyznaczana jest z zależności:

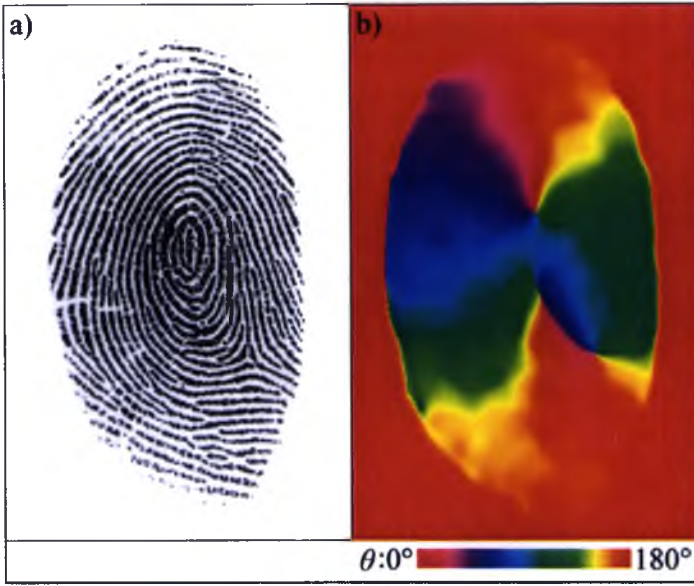
$$\#\Omega = N \times M \quad (2.7)$$

gdzie:

N, M - pikselowe wymiary analizowanego obrazu I .

Zbiór Ω nazywany jest obrazem kierunków (ang. *orientation image*) i można go przedstawić w postaci graficznej. Przykładowy obraz kierunków listewek skórných we wszystkich $N \times M$ punktach obrazu I linii papilarnych przedstawiono na Rys. 2.4b.

Zgodnie z Definicją 2.6, w każdym punkcie obrazu $p(x, y)$ wyznaczono lokalny kierunek listewki skórnej. Obraz na Rys. 2.4b prezentuje więc wynik odwzorowania $F : I \rightarrow \Omega$.



Rysunek 2.4: Oryginalny obraz linii papilarnych, b) obraz kierunków - graficzna reprezentacja nachylenia listewek skórnych do osi OX .

2.3.3 Częstość występowania listewek skórnych

Definicja 2.7. Lokalna częstość f występowania listewek skórnych (ang. *fingerprint frequency*) mierzona w punkcie $p(x, y)$ k -tej listewki, jest średnią harmoniczną odległości pikselowych l_n , $n = 1, \dots, 2i$ pomiędzy listewkami $k - i, \dots, k - 1, k, k + 1, \dots, k + i$:

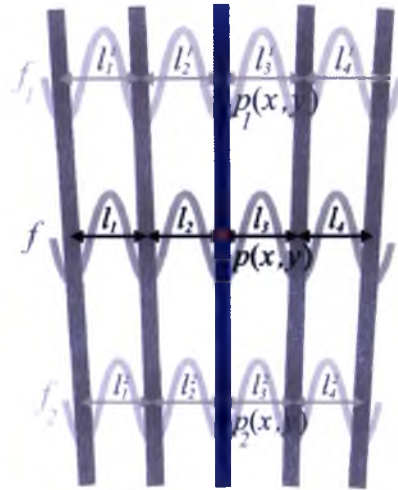
$$f(x, y) = \frac{n}{\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \dots + \frac{1}{l_n}} \quad (2.8)$$

gdzie:

i - liczba listewek branych pod uwagę z prawej i lewej strony listewki k .

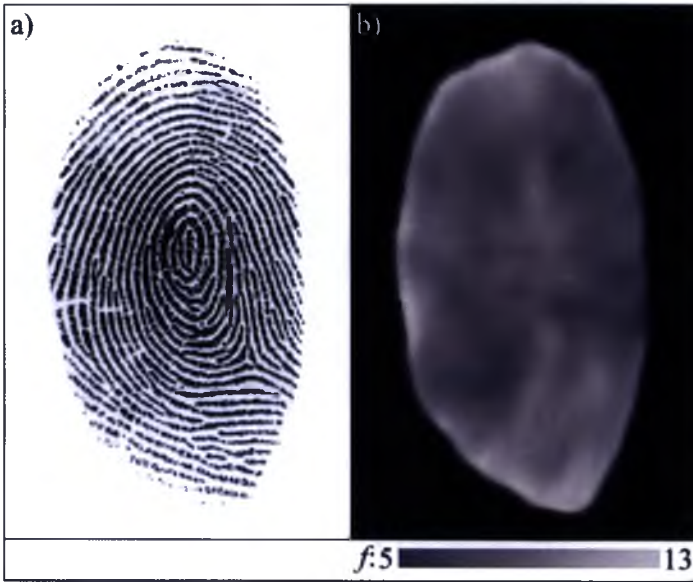
Przyjmuje się, że częstość f wyznaczana jest dla warunku $i \geq 1$. Sposób określania odległości pomiędzy listewkami skórnymi w poszczególnych punktach obrazu, zaprezentowano na Rys. 2.5. Częstość f można wyznaczać dla listewek skórnych oraz bruzd linii papilarnych.

Zbiór Γ lokalnych częstości ma taką samą moc jak zbiór Ω . Zbiór Γ przedstawić można w postaci obrazu. Przykładową graficzną reprezentację takiego zbioru przedstawiono na Rys. 2.6b. W każdym punkcie obrazu $p(x, y)$ wyznaczono war-



Rysunek 2.5: Odległości l pomiędzy pięcioma sąsiadującymi listewkami skórnymi.

tość częstości f , zgodnie z Definicją 2.7. Obraz na Rys. 2.6b prezentuje więc wynik odwzorowania $F : I \rightarrow \Gamma$.



Rysunek 2.6: a) Oryginalny obraz linii papilarnych, b) graficzna prezentacja rozkładu lokalnych częstości f występowania listewek skórných.

Obrazy lokalnego kierunku listewek skórných oraz częstości ich występowania mogą być bardzo podobne dla wielu obrazów linii papilarných. Z tych powodów

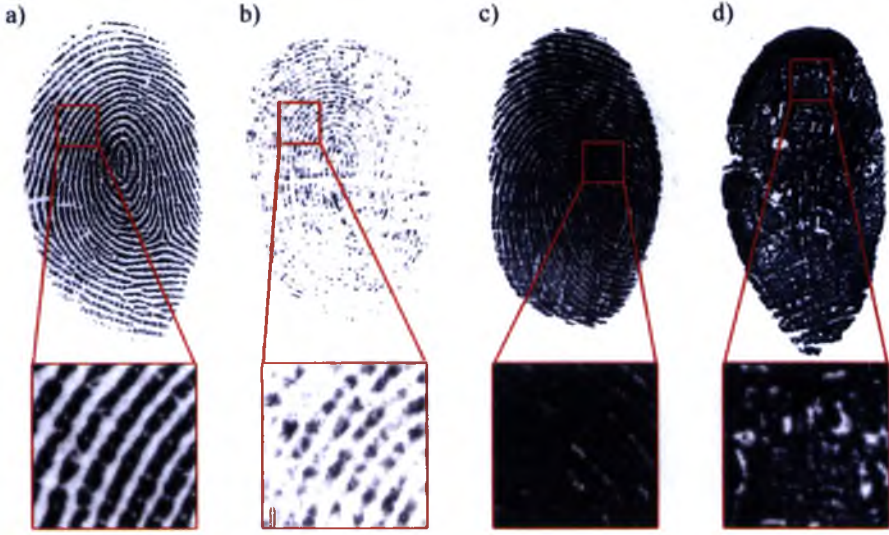
cechy te nie są wykorzystywane bezpośrednio w metodach identyfikacji lub weryfikacji. Należy jednak zwrócić uwagę, że wymienione cechy zawierają istotne informacje o rozkładzie linii papilarnych. Ich wyznaczenie ma więc krytyczny wpływ na segmentację obrazu [28, 87, 136], wyznaczanie cech osobniczych (ang. *singularities*) [13, 14, 24, 93], klasyfikację [22, 60, 77, 101, 118], detekcję minucji fałszywych [124], porównywanie struktur minucji [76, 99, 125], czy poprawę jakości (czytelności) rysunku listewek skórnych [52, 115, 119].

2.4 Jakość obrazu linii papilarnych

Z powodu zmiennych warunków akwizycji danych, stopnia potliwości oraz chorób naskórka obrazy linii papilarnych mogą się znacząco różnić. Wysokiej jakości obrazy linii papilarnych charakteryzują dużym kontrastem wzoru listewek skórnych względem bruzd. Listewki skórne na takim obrazie powinny być ciągłe (nieprzerwane) oraz wyraźnie oddzielone od siebie bruzdą (Rys. 2.7a). Ze względu na różny stopień potliwości skóry linie papilarne na obrazie mogą mieć charakter szczątkowy (tzw. *odciski suche* - Rys. 2.7b) lub też ze względu na wypełnienie bruzd różnymi płynami (np. potem) mogą być na obrazie złączone (są to tzw. *odciski mokre* - Rys. 2.7c). Jak wykazują badania [103], prawie 4% populacji ludzkiej posiada nieczytelną lub niewidoczną strukturę linii papilarnych (Rys. 2.7d). Spowodowane to może być mutacjami genetycznymi lub chorobami naskórka.

Czynniki zmniejszające czytelność linii papilarnych (Rys. 2.7) można częściowo wyeliminować w warunkach akwizycji kontrolowanej - np. podczas zdejmowania odcisków na posterunkach policji. Nie jest to możliwe w przypadku obrazów śladów kryminalnych.

Niska jakość obrazów linii papilarnych może powodować wystąpienie zjawiska wykrywania minucji fałszywych, co ma szczególne znaczenie w systemach automatycznego wyznaczania tego parametru. Jako przykład można podać automatyczną lokalizację minucji na obrazach odcisków suchych - dla tego typu obrazów mogą zostać błędnie wygenerowane fałszywe minucje typu zakończenie, a w przypadku odcisków mokrych - minucje typu rozwidlenie.



Rysunek 2.7: a) Obraz linii papilarnych wysokiej jakości - o czytelnej strukturze listewek skórnych. Obrazy niskiej jakości - o nieczytelnej strukturze listewek skórnych: b) tzw. *odcisk suchy*, c) tzw. *odcisk mokry*, d) nieczytelna struktura linii papilarnych (brak widocznych listewek skórnych) spowodowana twardziną skóry (łac. *scleroderma*).

2.5 Podobieństwo obrazów linii papilarnych

Celem algorytmów porównujących konstelację minucji jest wyznaczenie podobieństwa zbioru minucji badanego obrazu linii papilarnych, ze zbiorem zapisanym w rekordzie komputerowej bazy danych.

Minucje obiektu ϖ , opisane macierzą $\nu^{\varpi} = [(\mathbf{m}_1^{\varpi})^T, (\mathbf{m}_2^{\varpi})^T, \dots, (\mathbf{m}_a^{\varpi})^T]$, porównywane są z macierzami minucji obiektów wzorcowych ν^j , $j = 1, \dots, d$, zapisanymi w d rekordach bazy danych. Obrazy linii papilarnych (analizowane obiekty) mogą w szczególności zawierać różną liczbę minucji:

$$\begin{aligned} \nu^{\varpi} &= [(\mathbf{m}_1^{\varpi})^T, (\mathbf{m}_2^{\varpi})^T, \dots, (\mathbf{m}_a^{\varpi})^T], & \mathbf{m}_k^{\varpi} &= [x_k^{\varpi}, y_k^{\varpi}, \varphi_k^{\varpi}], \\ \nu^j &= [(\mathbf{m}_1^j)^T, (\mathbf{m}_2^j)^T, \dots, (\mathbf{m}_b^j)^T], & \mathbf{m}_n^j &= [x_n^j, y_n^j, \varphi_n^j], \end{aligned} \quad (2.9)$$

gdzie:

$$k = 1, 2, \dots, a, n = 1, 2, \dots, b, j = 1, 2, \dots, d,$$

a i b - są liczbami minucji obiektów ϖ oraz j .

W procesie akwizycji, przedzielonym pewnym interwałem czasowym, można uzyskać różne obrazy linii papilarnych tego samego palca. Z tego powodu, po-

równywanie macierzy minucji ν^{ϖ} z szablonem (wzorcem) ν^j wymaga znalezienia takiej transformacji jednej z macierzy, która maksymalizuje liczbę wspólnych minucji w obu macierzach. Tym sposobem można ustalić podobieństwo minucji dwóch obrazów linii papilarnych.

Definicja 2.8. Funkcja transformująca *map* jest takim odwzorowaniem $map : \mathbf{m}_n \xrightarrow{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \varphi_i} (\mathbf{m}_n)'$ dowolnej minucji $\mathbf{m}_n = [x_n, y_n, \varphi_n]$, które lokuje ją w nowej pozycji $(\mathbf{m}_n)'$, takiej że:

$$(\mathbf{m}_n)' = \{x_n + \Delta x_i, y_n + \Delta y_i, \varphi_n + \Delta \varphi_i\} = \{x'_n, y'_n, \varphi'_n\} \quad (2.10)$$

gdzie:

$$x_n + \Delta x_i = x'_n, \quad y_n + \Delta y_i = y'_n, \quad \varphi_n + \Delta \varphi_i = \varphi'_n, \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} x'_n \\ y'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta \varphi_i & -\sin \Delta \varphi_i \\ \sin \Delta \varphi_i & \cos \Delta \varphi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Pojedyncza minucja opisana jest współrzędnymi pikselowymi oraz kątem nachylenia φ . Z tego względu próg podobieństwa T (wzory 2.1 - 2.5) należy wyznaczyć osobno dla położenia oraz nachylenia każdej porównywanej pary minucji [58].

Definicja 2.9. Minucja $\mathbf{m}_k^{\varpi} = [x_k^{\varpi}, y_k^{\varpi}, \varphi_k^{\varpi}]$ jest podobna do minucji $(\mathbf{m}_n^j)' = [x_n^{j'}, y_n^{j'}, \varphi_n^{j'}]$ jeśli dla funkcji binarnej λ funkcja ta przyjmuje wartość 1:

$$\lambda(\mathbf{m}_k^{\varpi}, (\mathbf{m}_n^j)') = \begin{cases} 1 & \text{gdy } sd(\mathbf{m}_k^{\varpi}, (\mathbf{m}_n^j)') \leq r_0 \wedge dd(\mathbf{m}_k^{\varpi}, (\mathbf{m}_n^j)') \leq \varphi_0 \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.13)$$

gdzie dla ustalonych progów tolerancji r_0 oraz φ_0 :

- odległość euklidesowa sd (ang. *spatial distance*) wyrażona jest wzorem:

$$sd(\mathbf{m}_k^{\varpi}, (\mathbf{m}_n^j)') = \sqrt{(x_k^{\varpi} - x_n^{j'})^2 + (y_k^{\varpi} - y_n^{j'})^2} \leq r_0, \quad (2.14)$$

- różnica dd (ang. *direction difference*) kątów nachylenia minucji do osi OX określona jest wzorem:

$$dd(\mathbf{m}_k^{\varpi}, (\mathbf{m}_n^j)') = \min(|\varphi_k^{\varpi} - \varphi_n^{j'}|, 2\pi - |\varphi_k^{\varpi} - \varphi_n^{j'}|) \leq \varphi_0, \quad (2.15)$$

W przypadku minucji niepodobnych funkcja λ przyjmuje wartość 0.

Współczynnik podobieństwa S obrazów linii papilarnych określany jest jako liczba podobnych minucji w obu obrazach. Na podstawie Definicji 2.3 i 2.4, w zależności od ustalonego progu podobieństwa T ustalamy czy obiekty są podobne.

Niech dane są minucje obiektu ϖ , opisane macierzą minucji ν^{ϖ} oraz minucje obiektu j , opisane macierzą minucji ν^j . Wyznaczenie podobieństwa obiektów ϖ oraz j sprowadza się do $k \times n$ -krotnego zastosowania funkcji transformującej map wg Definicji 2.8, na podstawie której maksymalizowana jest liczba podobnych minucji, a więc współczynnik S :

$$S(\varpi, j) = \max\{s_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \varphi_i)\}, i = 1, \dots, k \times n \quad (2.16)$$

gdzie:

$$s_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \varphi_i) = \sum_{k=1}^a \sum_{n=1}^b \lambda \left(m_k^{\varpi}, map : m_n^j \xrightarrow{\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \varphi_i} (m_n^j)' \right), \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= x_k^{\varpi} - x_n^j, \\ \Delta y_i &= y_k^{\varpi} - y_n^j, \\ \Delta \varphi_i &= \min(|\varphi_k^{\varpi} - \varphi_n^j|, 2\pi - |\varphi_k^{\varpi} - \varphi_n^j|), \\ k &= 1, \dots, a, \quad n = 1, 2, \dots, b \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.6 Systemy identyfikacji daktyloskopijnej

Ze względu na stopień automatyzacji, systemy analizy linii papilarnych mogą pracować w dwóch trybach:

- tryb *on-line* - system w pełni zautomatyzowany, w którym wszystkie etapy analizy linii papilarnych są automatyzowane,
- tryb *off-line* - system, w którym etap akwizycji obrazu oraz ekstrakcja cech muszą być wspomagane przez eksperta.

Systemy *off-line* stosowane są głównie w policyjnych systemach identyfikacji AFIS (Automatyczny System Identyfikacji Daktyloskopijnej), w których akwizycja obrazu wykonywana jest przez służby kryminalne bezpośrednio na miejscu przestępstwa, bądź przez laboranta wizualizacji śladów. Analizowany obraz linii

papilarnych musi zostać przystosowany do standardów systemu AFIS. Ślad kryminalny, fotografowany jest w wysokiej rozdzielczości (ponad 2500 dpi). Tak pozyskany cyfrowy obraz jest następnie ręcznie wzmacniany (wyrównywanie histogramu, poprawa kontrastu) przez laboranta wizualizacji śladów. Proces wzmacniania obrazu nie powinien zakłócać wzoru linii papilarnych. W kolejnym kroku obraz skalowany jest do rozdzielczości 500dpi, co wynika z wymogów systemu AFIS. Tak przygotowany obraz może być wprowadzony do policyjnego systemu identyfikacji daktyloskopijnej, który automatycznie wyznacza położenie minucji na analizowanym obrazie. W dalszym procesie obróbki obrazu policyjny ekspert daktyloskopii dokonuje weryfikacji automatycznie wyznaczonych cech. Błędnie wyznaczone minucje są ręcznie usuwane oraz oznaczane są dodatkowe, nierozpoznane przez system AFIS, miejsca występowania minucji.

Zgodnie z obserwacjami autora, poczynionymi w trakcie pracy w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Komendy Głównej Policji w Warszawie, opisana powyżej procedura wymaga żmudnej, czasochłonnej pracy, a czas jaki upływa od chwili ujawnienia śladu, do ewentualnej identyfikacji osoby wynosi około czterech tygodni. Jedynie w wyjątkowych, bardzo ważnych sprawach, prowadzonych w trybie przyspieszonym, identyfikacja następuje w ciągu 24 godzin. W większości biometrycznych systemów *off-line*, proces identyfikacji nie jest jednoznaczny i w jego wyniku ustalany jest najbardziej podobny, według ustalonego kryterium, zbiór cech, odpowiadający wzorcowi. Tym sposobem system AFIS zwraca przeważnie wynik w postaci zbioru obrazów odcisków linii papilarnych, najbardziej podobnych do wzorca. Kolejne eliminacje odbywają się innymi technikami kryminalnymi, co nie jest zainteresowaniem niniejszej rozprawy. W rozprawie doktorskiej zaproponowano rozwiązania, które ułatwiają pracę eksperta daktyloskopii obsługującego system AFIS, co zostało potwierdzone badaniami autora w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym w Warszawie.

Systemy *on-line* stosowane w komercyjnych aplikacjach, wymagających natychmiastowej i jednoznacznej identyfikacji (np. logowanie do systemu komputerowego lub weryfikacja tożsamości osoby na przejściu granicznym). Popełniane przez systemy *on-line* błędy rozpoznawania, choć dokuczliwe, są dopuszczalne. W niniejszej pracy zaproponowano rozwiązania, które mogą poprawić skuteczność rozpoznawania w takich systemach, jednakże nie jest to głównym celem pracy.

Nieczytelna struktura linii papilarnych oraz występujące na obrazie artefakty (szумы) powodują, że w procesie automatycznego wyznaczania minucji pojawiają

się błędy w postaci minucji fałszywych. Zjawisko to jest niepożądane i powoduje, że ekspert daktyloskopii musi dokonywać wzrokowej oceny wyników, usuwając błędne lub oznaczając dodatkowe, nierozpoznane minucje. Z tego względu większość systemów AFIS wykorzystuje dodatkowe procedury przetwarzania poprawiające jakość obrazu linii papilarnych. W działaniach tych wykorzystuje się metody przetwarzania obrazu (ang. *image processing*) oraz metody, za pomocą których wyodrębnia się specyficzne, niewidoczne cechy linii papilarnych (np. obraz kierunków, częstość występowania listewek skórnych, itp.). Wyodrębnianie dodatkowych cech wykorzystywane jest zarówno w systemach *on-line* jak i w systemach *off-line*, w tym w policyjnych systemach AFIS.

Wyznaczanie cech linii papilarnych na obrazie jest więc procesem wieloetapowym, składającym się z szeregu powiązanych ze sobą algorytmów, często kilkuprzebiegowych. Algorytmy te można podzielić na:

- **Algorytmy poprawy jakości rysunku listewek skórnych.**

Są to algorytmy, których celem jest uzyskanie obrazu, na którym rysunek listewek skórnych jest bardziej czytelny. Do tej grupy można zaliczyć zarówno proste algorytmy zwiększania kontrastu, wyrównywania zakresu tonalnego, normalizacji obrazu jak również bardziej złożone algorytmy, w których stosuje się filtrację anizotropową lub filtrację Gabora [52].

- **Algorytmy analizy obrazu linii papilarnych.**

Do tej grupy algorytmów zaliczane są metody, poszukiwania listewek skórnych, wyznaczania kierunku ich przebiegu oraz częstości ich występowania, a także metody lokalizacji minucji na liniach papilarnych.

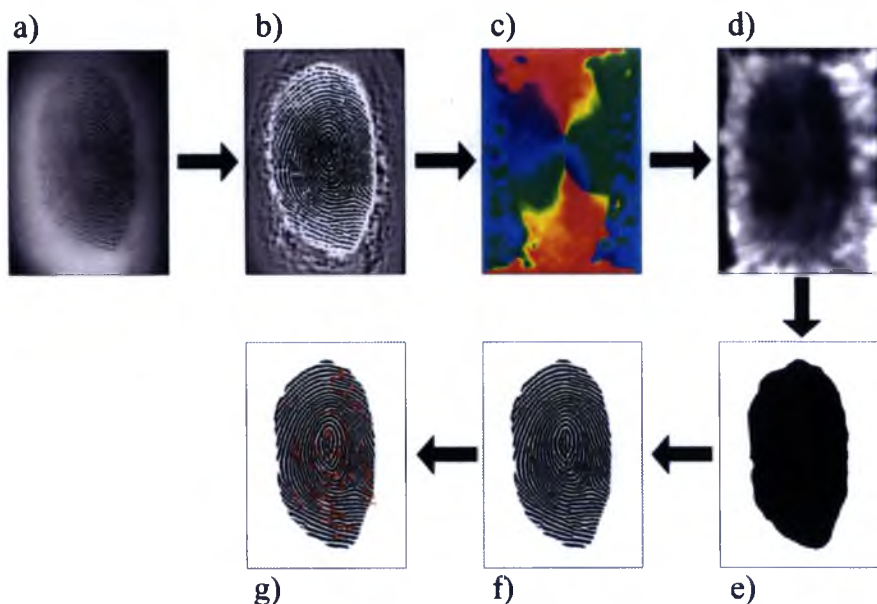
Wymienione powyżej grupy algorytmów są od siebie zależne. Z tego powodu muszą być one wykonywane w określonej kolejności. Kolejność oraz efekty działania tych algorytmów (opisanych szczegółowo w dalszej części rozprawy) przedstawiono poglądowo i jeszcze nieformalnie na Rys. 2.8.

W wymienionych algorytmach wykonywane są szczegółowe procedury, które omówiono poniżej.

Normalizacja obrazu.

Proces normalizacji może być prowadzony w trybie ręcznym lub automatycznym. W systemach policyjnych wykorzystywane są obie techniki normalizacji.

Ręczne przygotowanie obrazu przez laboranta wizualizacji śladów sprowadza się do przystosowania go do wymogów systemu AFIS. Obraz taki musi być



Rysunek 2.8: Etapy analizy i poprawy jakości obrazu linii papilarnych. a) Oryginalny obraz linii papilarnych, b) normalizacja obrazu, c) obraz kierunków listewek skórnych, d) obraz częstości występowania listewek skórnych, e) ekstrakcja tła obrazu, f) obraz bez tła z poprawioną jakością rysunku listewek skórnych, g) obraz ze zlokalizowanymi minucjami.

zapisany w skali szarości (0-255) oraz w rozdzielczość 500dpi. W reżimie automatycznym wyrównywane są kontrast oraz histogram obrazu linii papilarnych, co powoduje zwiększenie rozpiętości tonalnej obrazu listewek. Zabiegi te powodują, że obraz listewek skórnych staje się lepiej widoczny.

Na potrzeby rozprawy, przyjmuje się, że pojęcie normalizacji obrazu odnosi się tylko do metod automatycznych.

Wyznaczenie obrazu kierunków oraz częstości występowania linii papilarnych.

Wymienione cechy opisane już zostały w Rozdziałach 2.3.2 i 2.3.3. Algorytmy odpowiedzialne za wyznaczenie tych cech muszą być wykonywane w odpowiedniej kolejności. Najpierw wykonywana jest procedura wyznaczająca kierunki listewek skórnych, a w kolejnym etapie procedura wyznaczająca częstość występowania listewek.

Wyodrębnienie tła obrazu (segmentacja obrazu).

Polega na wyznaczeniu rozłącznych obszarów tła obrazu oraz obszaru występowania listewek skórnych.

Poprawa jakości rysunku listewek skórnych.

Pojęcie poprawy jakości mało czytelnych fragmentów listewek skórnych oznacza wzmacnianie lub rekonstruowanie fragmentów obrazu na podstawie wartości kierunków lub częstości występowania listewek. Stosowania poprawy jakości pozwala na zmniejszenie liczby błędnych wyznaczeń minucji.

Lokalizacja minucji.

Polega na wyznaczeniu położenia minucji wraz z odpowiadającymi im wartościami kierunkowymi.

Rozdział 3

Przegląd literatury

3.1 Metody normalizacji obrazu linii papilarnych

Proces normalizacji pozwala na zmniejszenie różnic pomiędzy obrazami pochodzącymi z różnych typów źródeł akwizycji oraz wynikających z różnej potliwości naskórka lub siły nacisku palca na podłoże. Normalizacja stosowana jest w celu ustandaryzowania jasności pikseli obrazu, tak aby zakres odcieni szarości linii papilarnych i bruzd skórnych mieścił się w określonych przedziałach wartości. Proces ten nie powinien wpływać na strukturę rysunku linii papilarnych, a jedynie zmieniać rozpiętość tonalną obrazu tak, aby kontrast listewek skórnych względem bruzd był możliwie największy [58].

Metody normalizacji obrazu linii papilarnych są słabo reprezentowane w literaturze przedmiotu, co wiąże się z popularnością metod poprawy jakości wykorzystujących filtr Gabora, w których etap normalizacji jest zbędny.

Ze względu na prostotę implementacyjną, metoda zaproponowana przez Honga, Jaina i Wana [52] jest obecnie najczęściej wykorzystywana [19, 26, 60, 61, 63, 67, 89, 128]. W metodzie tej znormalizowana wartość piksela wyznaczana jest na podstawie średniej wartości wszystkich pikseli obrazu oraz miary ich zróżnicowania. Metoda [52] oddziałuje na obraz globalnie, co nie pozwala na uzyskiwanie zadowalających rezultatów dla obrazów o nierównomiernym kontraście. Rozwiązanie tego problemu przedstawiono w pracach Kovacs-Vajna [74], Kima i Parka [71] oraz Greenberga [40]. W metodach [71, 74] średnia wartość pikseli oraz ich zróżnicowania, wykorzystywana w procesie normalizacji, wyznaczana jest lo-

kalnie - w blokach o rozmiarach obejmujących minimum dwie listewki skórne [71, 74]. Greenberg zaproponował jeszcze dokładniejsze wyznaczanie tych wartości w lokalnym otoczeniu każdego piksela obrazu [40]. Również w metodzie zaproponowanej w niniejszej rozprawie, lokalne wartości średniej pikseli oraz ich zróżnicowania są wyznaczane osobno dla każdego piksela obrazu. Będzie o tym mowa w rozdziale 4.1.

3.2 Metody wyznaczania obrazu kierunków listewek skórnych

Obraz kierunków zawiera istotną informację o topologii listewek skórnych. Dlatego jego wyznaczenie ma znaczenie krytyczne dla dalszych etapów przetwarzania obrazu i stanowi podstawowy składnik algorytmów poprawy jakości [52, 113, 133]. Algorytmy tego typu gwarantują, że wzory linii papilarnych nie zostaną zniekształcone lub usunięte.

Ze względu na duże znaczenie obrazu kierunków, opracowano wiele metod wyznaczania tej cechy, jak na przykład maski wzorców (ang. *matched-filter/pixel-alignment*) [32, 45, 51, 60, 69, 80], estymacja widmowa (ang. *spectral estimation*) [91, 120, 132], mikroszablony dopasowujące (ang. *micropatterns template*) [77], czy też projekcja linii papilarnych (ang. *waveform projection/ridge projection*) [107].

W metodach masek wzorcowych wykorzystuje się fakt, że fluktuacja odcieni szarości pikseli jest najmniejsza wzdłuż kierunku przebiegu linii papilarnych, a największa w kierunku do nich prostopadłym. Za pomocą specjalnej maski, wyznaczany jest kierunek najmniejszej fluktuacji, utożsamiany z lokalnym kierunkiem przebiegu listewki [69].

W metodach estymacji widmowej kąt nachylenia listewek skórnych wyznaczany jest na podstawie analizy widma Fouriera obrazu. Wartość kąta nachylenia listewek jest estymowana na podstawie największych składowych widma Fouriera. Metody analizy widmowej są jednak bardzo kosztowne obliczeniowo, a wynikowe wartości są zbliżone do wartości uzyskiwanych przez szybsze metody masek wzorcowych [135]. Dodatkowo, w metodach widmowych oraz maski wzorców wartości obrazu kierunków są dyskretne, ograniczone do wybranych kątów próbkowania (przykładowo od 0° do $157,5^\circ$ z krokiem co $22,5^\circ$) [32, 45, 60, 132].

W systemach, gdzie poprawa jakości obrazu jest zadaniem krytycznym stosowane są często metody gradientowe (ang. *gradient-based methods*) [13, 30, 52,

59, 83, 95, 100, 102]. Przyjmując, że różnicę zmiany wartości poziomego i pionowego gradientu sąsiadujących pikseli można potraktować jako skierowany wektor zmian, możliwe staje się wyznaczenie, dla każdego piksela obrazu, wypadkowego kierunku zmian gradientu. Kierunek ten jest prostopadły do kierunku lokalnego przebiegu linii papilarnej. Jedynym problemem bezpośredniego wyznaczenia wartości kierunkowej tą metodą, jest fakt iż wektory gradientów położonych po przeciwnych stronach linii papilarnej są przeciwnie skierowane, co powoduje, że ich uśrednione wartości wzajemnie się znoszą. Problem ten został rozwiązany w metodzie najmniejszych średnich kwadratów (ang. *least mean square*) Kassa i Witkina [70], opisaną dokładnie w Rozdziale 4.4. Wymieniona metoda zapewnia największą dokładność wyznaczania obrazu kierunków.

Należy jednak zauważyć, że w metodzie gradientowej, chociaż bardzo dokładnej, wykorzystuje się w obliczeniach znajomość kolorów (odcieni szarości) poszczególnych pikseli, co powoduje, że metoda ta jest czuła na zaszumienie obrazu. Z tych powodów opracowano metody eliminujące wpływ tego zjawiska. Metody te można podzielić na dwie kategorie: metody filtracji (ang. *filter-based methods*) [59, 83] oraz metody modelowania matematycznego (ang. *model-based methods*) [44, 106, 116, 135].

Metody oparte na modelowaniu matematycznym wzorów linii papilarnych zaproponowane przez Sherlocka i Monro [106] wykorzystują fakt, że kierunek linii papilarnych w otoczeniu terminu wewnętrznego oraz delt jest regularny, a jego zmienność nie jest gwałtowna. Pozwala to na wybór najbardziej odpowiednich pikseli w procesie uśredniania. Jednakże metoda ta nie sprawdza się w przypadku obrazów klasyfikowanych jako łukowe [49]. Problem ten rozwiązyali Zhou i Gu [44, 135], którzy zaproponowali kombinację modelu wielomianowego [106] z modelem punktu ciężkości [136]. Model wielomianowy pozwala na aproksymację globalnej orientacji linii papilarnych, a model punktu ciężkości poprawia obraz kierunku w miejscach o wysokiej zmienności krzywizny linii papilarnych w obszarze terminu wewnętrznego i delt.

Metody modelowania matematycznego zapewniają najlepszą estymację obrazu kierunków względem rzeczywistej orientacji linii papilarnych. Wymóg wskazania terminu wewnętrznego oraz delt powoduje, że wymienione metody znajdują zastosowania jedynie w aplikacjach cywilnych, gdzie możliwe jest zapewnienie jednakowych warunków akwizycji obrazu. Nie jest to możliwe w przypadku śladów linii papilarnych pozostawionych w miejscach przestępstw. Obrazy takie są często niepełne, co powoduje, że nie tylko niemożliwe jest wskazanie cech osobli-

wych, ale również określenie klasy wzoru.

Problem ten nie występuje w przypadku stosowania metod filtracji obrazu, gdyż najczęściej wykorzystują one dolnoprzepustowy filtr Gaussa [51, 60]. Filtr gaussowski może być modelowany przez dobór jego parametrów [6, 91, 112]. Rozwiązanie takie jest jednak kosztowne obliczeniowo.

W rozprawie, w celu wyznaczania obrazu kierunków, zaproponowano zmodyfikowaną metodę maski wzorców oraz metodę gradientową z uśrednianiem Gaussowskim. Wybór obydwu metod pozwala na uzyskanie obrazu kierunków wysokiej jakości, nawet w przypadku obrazów o dużym stopniu zaszumienia, co przedstawiono w Rozdziałach 4.2 - 4.4.

3.3 Metody wyznaczania częstości występowania listewek skórnych

Częstość występowania listewek skórnych może się znacząco zmieniać w różnych obszarach obrazu linii papilarnych. Ze względu na istotność tej cechy opracowano metody automatycznego wyznaczania jej wartości. Metody te można podzielić na metody pośrednie [52, 53, 91, 137], wymagające wcześniejszego wyznaczenia obrazu kierunku, oraz metody bezpośrednie [75, 84, 130], gdzie wartości kierunkowe są wyznaczane z nieprzetworzonego, źródłowego obrazu linii papilarnych.

W pierwszych opublikowanych metodach pośrednich częstość występowania listewek skórnych wyznana jest jedynie globalnie - dla całego obrazu [53, 91]. Dopiero implementacja algorytmów poprawy jakości rysunku listewek skórnych, opartych o filtr Gabora, wymusiła wyznaczanie tej cechy także lokalnie, z dużo większą dokładnością [52]. W metodzie Honga, Wana i Jaina [52] wykorzystywane jest okno o wymiarach 32×16 pikseli, w którym poszukiwane są maksymalne wartości pikseli, utożsamiane z grzbietami listewek skórnych. Duża szerokość okna zapewnia skuteczność nawet dla obrazów zaszumionych, jednakże koszty jej implementacji są duże.

W pracy Zhu i Yin [137] maksima lokalne (odpowiadające listewkom skórnym) wykrywane są w określonym przekroju obrazu, w nienachodzących na siebie blokach. Znacznie zmniejsza to złożoność obliczeniową metody, ale pogarsza dokładność wyników.

Maio i Maltoni opracowali metodę lokalnie aproksymującą wzór listewek skórnych, co pozwala na wyznaczenie częstości ich występowania [84]. Metoda ta wy-

maga lokalizacji na obrazie delt oraz terminów wewnętrznych, co nie zawsze jest możliwe.

Kovacs-Vajna zaproponował metodę wyznaczania częstości występowania listewek skórnych, opartą o transformatę Fouriera, nie wymagającą wcześniejszego wyznaczania obrazu kierunków [75]. Analiza wyników wskazuje jednak, że poszukiwana częstość jest zgodna z jej faktyczną wartością w mniej niż połowie próbkowanych bloków obrazu. Również Yin, Tian i Yang do wyznaczania częstości wykorzystali transformatę Fouriera [130]. Uzyskane przez autorów wyniki należy uznać za dobre. Autorzy przeprowadzili jednak eksperymenty tylko na 30 obrazach linii papilarnych, co nie pozwala na ocenę jej przydatności dla wymagających systemów AFIS. Z tego względu, metoda ta została dokładniej zbadana, co opisano w Rozdziale 5.4.3.

3.4 Metody wyodrębniania tła obrazu

Wyodrębnianie tła obrazu linii papilarnych, zwane również segmentacją obrazu, jest procesem rozdzielenia obrazu źródłowego na rozłączne obszary zawierające obraz listewek skórnych oraz tło. Przedstawione w literaturze metody segmentacji można podzielić na metody blokowe (ang. *block-wise methods*), [4, 5, 11, 25, 85, 86, 87, 102, 108, 129, 136] oraz dokładniejsze metody pikselowe (ang. *pixel-wise methods*) [12, 117, 122, 131, 134]. Spotkać można również odrębną klasyfikację na tzw. metody progowe (ang. *threshold methods*) [5, 6, 86, 87, 102, 108, 122] oraz metody nadzorowane (ang. *supervised methods*) [4, 12, 25, 62, 85, 129, 131, 136]. W metodach progowych w celu przyporządkowania obszarów obrazu (tło lub listewki skórne) stosowany jest podział obszarów obrazu na podstawie ustalonego progu. Metody nadzorowane wykorzystują liniową bądź nieliniową klasyfikację w celu oznaczania odpowiednich obszarów obrazu.

W metodzie zaproponowanej przez Mehtre i Chatterjee [87] obraz linii papilarnych dzielony jest na bloki o rozmiarach 16×16 , w których na podstawie określonego rozkładu odcieni szarości, dokonywana jest segmentacja obrazu. Metoda ta została kolejno udoskonalona o wyznaczanie wartości zróżnicowania pikseli [86], wartości obrazu kierunków [102] oraz spójności nachylenia listewek skórnych [11]. Wydaje się, że spośród znanych metod progowych, metoda Wu, Tulyakov i Govindaraju [122], wykorzystująca progowanie dynamiczne wyżej wymienionych cech za pomocą detektora wierzchołków Harrisa, daje najlepsze wyniki segmentacji obrazu [8].

Należy zauważyć, że żadna z opisywanych powyżej prac nie wykorzystuje informacji o częstości występowania listewek skórnych. Powtarzalność linii papilarnych jest cechą specyficzną, nie występującą w obszarze tła. Z tego też powodu naturalnym wydaje się wykorzystanie częstości występowania listewek w procesie segmentacji obrazu. Opracowana na potrzeby niniejszej rozprawy technika segmentacji korzysta z wartości częstości.

W metodach nadzorowanych Jain i Ratha [62] oraz Fernandez, Aguilar i Garcia [6] zaproponowali użycie filtracji Gabora. Bazen i Gerez zaadoptowali metody opisane w [6, 62] wykorzystując liniową kombinację filtru Gabora z użyciem perceptronu Rosenblatta jako klasyfikatora [12]. W metodach nadzorowanych segmentacja obrazu daje dobre rezultaty pod warunkiem, że obrazy charakteryzują się prostą strukturą tła. Obrazy takie występują przede wszystkim w systemach *on-line*, wykorzystujących elektroniczne skanery linii papilarnych.

3.5 Metody poprawy jakości rysunku listewek skórnych

W przypadku obrazów linii papilarnych klasyczne algorytmy poprawy jakości obrazów nie dają satysfakcjonujących wyników. Z tego względu stosowane są specjalizowane algorytmy podnoszące czytelność rysunku listewek skórnych. Metody te dzieli się na metody przestrzenne (filtracja w dziedzinie przestrzennej - ang. *spatial domain filtering*) oraz metody wykorzystujące transformaty (filtracja w dziedzinie częstotliwościowej - ang. *transform domain filtering*).

O’Gormann i Nickerson jako pierwsi opracowali algorytm poprawy jakości obrazów linii papilarnych [91]. Zaproponowali oni użycie anizotropowego filtru wygładzającego o charakterystyce gaussowskiej. Pozwala to na zwiększenie kontrastu obrazu w obszarze występowania listewek skórnych. Wymieniona metoda została ulepszona przez Greenberga [40], gdzie wykorzystano dodatkowo technikę adaptacyjną (ang. *structure adaptive filtering*) [126]. Jednakże, w omawianych pracach nie jest wykorzystywana informacja o częstości występowania listewek skórnych, co pozwoliłoby na rekonstrukcję wzoru listewek skórnych w miejscach występowania pęknięć naskórka (tzw. białe linie).

W prezentowanej rozprawie zastosowano wstępną poprawę jakości opartą o filtrację anizotropową, z dodatkową binaryzacją lokalną. W proponowanej metodzie wykorzystywana jest również informacja o częstotliwości występowania listewek skórnych, co pozwala na dokonanie rekonstrukcji listewek w miejscach

pęknięć naskórka. Nie jest to możliwe w metodach opisanych powyżej.

Filtr Gabora [29, 62] wykorzystywany jest w wielu metodach poprawy jakości obrazów linii papilarnych [17, 83, 115, 119, 127]. W jednej z najczęściej cytowanych metod, opracowanej przez Honga, Wana i Jaina [52], zestaw filtrów Gabora wykorzystano w celu dekompozycji obrazu na zbiór podobrazów. Następnie, na podstawie obrazu kierunków, dokonywane jest złożenie poprawionego obrazu linii papilarnych. Do poprawnego działania, metoda ta wymaga prawidłowo wyznaczonych wartości obrazu kierunków oraz częstości występowania listewek skórnych. Jednakże, w opublikowanej pracy wykorzystano mało odporną na zaśmiecenia metodę wyznaczania wartości kierunkowych Kassa i Witkina [70].

Odmiernym działaniem charakteryzują się metody działające w dziedzinie częstotliwościowej. Sherlock, Monro i Miliard zaproponowali metodę, nazwaną kierunkową filtracją fourierowską (ang. *directional Fourier filtering*) [107]. Technika ta, na podstawie dyskretnego obrazu kierunków, tworzy zbiór podobrazów widma, które filtrowane są za pomocą zestawu filtrów Butterwortha. Następnie przy pomocy odwrotnej transformacji Fouriera rekonstruowany jest obraz, który charakteryzuje się już lepszą czytelnością listewek skórnych. W metodzie tej założono, że odległość pomiędzy listewkami skórnymi jest stała, co jak wykazano w Rozdziale 5.4.1, jest założeniem błędnym.

Należy zauważyć, że z pośród powyższych technik poprawy jakości obrazu jedynie metoda oparta o filtr Gabora korzysta z informacji o lokalnej częstości występowania listewek skórnych. Dodatkowo łatwość implementacji skutkuje dużą popularnością tej metody. Niestety, konwolucja filtrami Gabora jest kosztowna obliczeniowo. Technika ta wbudowana jest również w system AFIS MetaMorpho wykorzystywany przez polską Policję.

3.6 Metody lokalizacji cech

Najważniejszymi cechami, charakteryzującymi obraz linii papilarnych są minucje oraz ich wartości kierunkowe [58]. Metody lokalizacji minucji, w zależności od rodzaju analizowanego obrazu, można podzielić na trzy kategorie:

- metody szkieletyzacji - lokalizacja minucji odbywa się na obrazie poddanym wcześniejszej szkieletyzacji,
- metody bezpośrednie - lokalizacja minucji wykonywana jest na obrazach, które wcześniej zostały poddane procedurze poprawy jakości (binaryzacji),

- metody uczenia maszynowego (ang. *machine learning*) - minucje lokalizowane są bezpośrednio z surowego obrazu za pomocą technik uczenia maszynowego.

Spośród wyżej wymienionych, najczęściej wykorzystywane są metody szkieletyzacji [58]. Większość znanych implementacji tej techniki opiera się na założeniach przedstawionych przez Mehtre i Chatterjee [86]. Metody te do poprawnego działania wymagają wcześniejszej segmentacji i binaryzacji obrazu [86, 88, 102, 123], a następnie wykonywana jest szkieletyzacja wzoru listewek skórnych [10, 20, 78, 114]. Poprawność działania tych metod jest silnie zależna od jakości zbinaryzowanego obrazu, z tego względu wskazana jest wcześniejsza poprawa jakości obrazu.

Poprawa jakości obrazu oraz specjalizowana binaryzacja lokalna są złożonymi operacjami o dużej złożoności obliczeniowej. Z tego powodu coraz częstszym tematem badań stają się metody lokalizowania minucji bezpośrednio z obrazów linii papilarnych zapisanych w odcieniach szarości [36, 65, 81, 83]. Dotychczasowe wyniki wskazują jednak dalszą potrzebę stosowania technik poprawy jakości, w przypadku obrazów o niskiej czytelności listewek skórnych.

Również metody uczenia maszynowego (ang. *machine learning*) są wykorzystywane do bezpośredniej lokalizacji minucji [15, 79, 97, 104]. Jednakże, ze względu na dużą złożoność obliczeniową nie są one praktycznie stosowane w systemach AFIS.

Rozdział 4

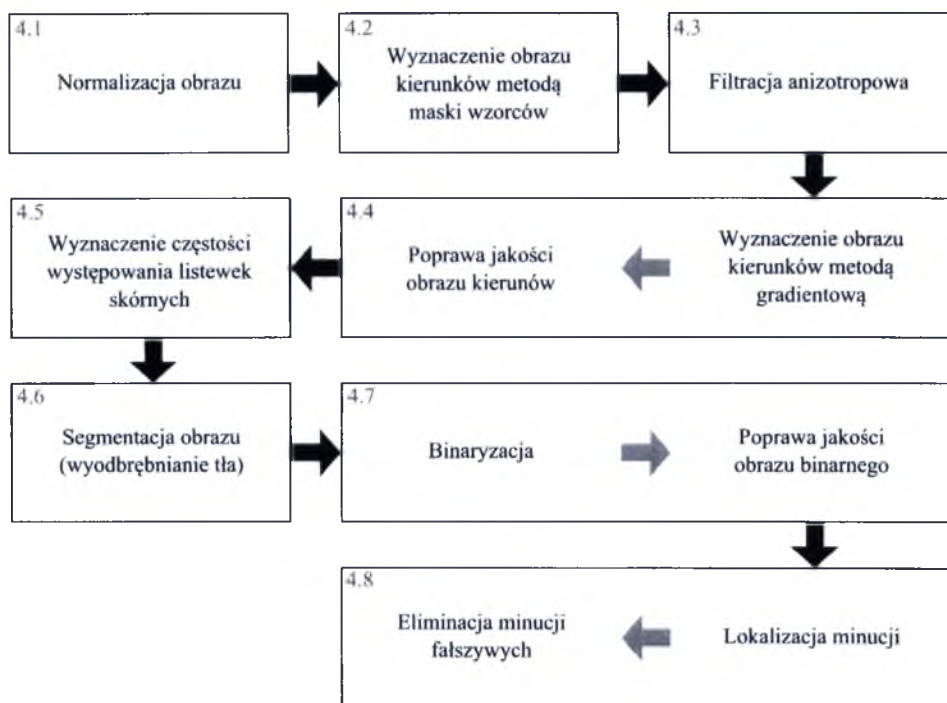
Analiza i poprawa jakości obrazów linii papilarnych

Opracowana na potrzeby rozprawy metoda analizy i poprawy jakości obrazów linii papilarnych składa się z wielu powiązanych ze sobą algorytmów. Kolejność wykonywania tych algorytmów jest ściśle określona i została przedstawiona na Rys. 4.1.

4.1 Normalizacja obrazu linii papilarnych

W pracy zaproponowano poprawę jakości rysunku linii papilarnych za pomocą filtracji anizotropowej - technikę tę zaprezentowano w Rozdziale 4.3. Filtracja anizotropowa pozwala na eliminację większości artefaktów na obrazie linii papilarnych (np. likwidacja białych linii powstałych w wyniku pęknięć naskórka). Filtracja tego typu wymaga jednak obrazów o równomiernym kontraście. Wyrównanie kontrastu można osiągnąć przez zastosowanie lokalnej normalizacji obrazu - co wykorzystano w pracy.

Normalizacja lokalna jest wykonywana w oknach W o rozmiarze $\omega \times \omega = 17 \times 17$. Rozmiar okna został ustalony eksperymentalnie w ten sposób, aby na obrazie w rozdzielczości 500dpi okno W obejmowało dwie listewki skórne (ustalenie parametrów algorytmów opisano dokładnie w Rozdziale 5.4.1).



Rysunek 4.1: Etapy realizacji algorytmów analizy i poprawy jakości obrazów linii papilarnych. Poszczególne etapy zostały oznaczone numerem opisujących je rozdziałów.

Zaproponowany w rozprawie algorytm normalizacji można opisać w zwartej formie, w sposób następujący:

Algorytm 1. *Normalizacja obrazu linii papilarnych.*

Krok 1

Umieść środek okna W nad normalizowanym pikselem $p_i \equiv I(x, y)$ obrazu. Niech K jest zbiorem wszystkich pikseli $\{p_1, p_2, \dots, p_{\omega \times \omega}\}$ zawartych wewnątrz okna W .

Krok 2

W zbiorze K znajdź piksele o maksymalnej i minimalnej wartości:

$$\begin{aligned} p_{\max}(x, y) &= \max\{p_1, p_2, \dots, p_{\omega \times \omega}\}, \\ p_{\min}(x, y) &= \min\{p_1, p_2, \dots, p_{\omega \times \omega}\} \end{aligned} \quad (4.1)$$

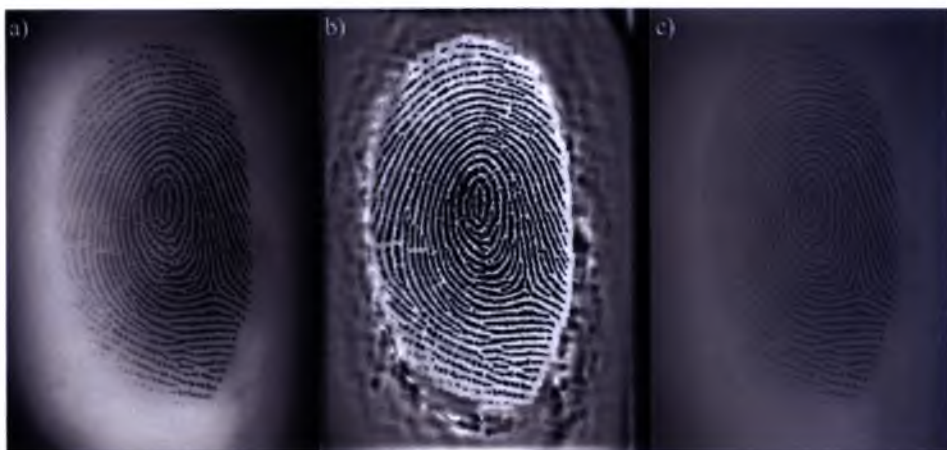
Elementy okna W leżące poza obszarem obrazu I nie są brane pod uwagę w obliczeniach.

Krok 3

Wyznacz znormalizowaną lokalnie wartość piksela w punkcie $I_{norm}(x, y)$:

$$I_{norm}(x, y) = \frac{255(I(x, y) - p_{min}(x, y))}{p_{max}(x, y) - p_{min}(x, y)} \quad (4.2)$$

Przedstawiony algorytm normalizacji pozwala na wyrównanie kontrastu w przypadku, gdy listewki skórne są jaśniejsze od obszarów tła (Rys. 4.2b), co nie jest możliwe przy stosowaniu normalizacji globalnej [52] (Rys. 4.2c).



Rysunek 4.2: a) Oryginalny obraz linii papilarnych, b) obraz znormalizowany lokalnie, c) obraz po normalizacji globalnej [52].

Zaproponowana metoda normalizacji w przypadku obrazów o ciemnym tle może generować w tych obszarach artefakty (Rys. 4.2b), co w przypadku standardowych algorytmów segmentacji obrazu może powodować, że tło obrazu także będzie zaliczone do obszaru linii papilarnych. Z tego względu w pracy zaproponowano dedykowaną metodę segmentacji obrazu, opisaną w rozdziale 4.6.

4.2 Obraz kierunków wyznaczany metodą maski wzorców

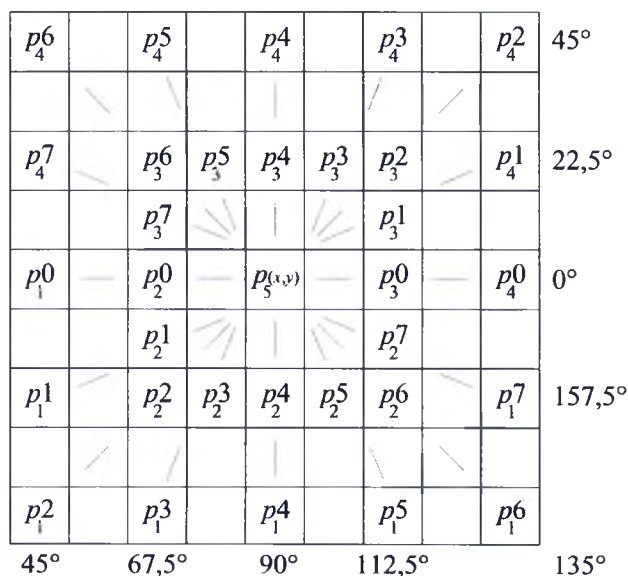
Przeprowadzone na potrzeby rozprawy badania porównawcze (szczegółowo przedstawione w Rozdziale 5.4.2) wykazały, że metoda wyznaczania obrazu kierunków

linii papilarnych za pomocą maski wzorców [66], w przypadku silnie zaszumionych obrazów, jest dokładniejsza w porównaniu do metody gradientowej [70]. Obrazy zaszumione często występują w praktyce kryminalistycznej.

W pracy zaproponowano fuzję obu wymienionych metod, co pozwala na dokładne wyznaczanie nachylenia linii także dla obrazów o niskiej jakości (z szumem).

Przed wyznaczeniem kierunków metodą gradientową (Rozdział 4.4), obraz odcisku linii papilarnych należy poddać procedurze poprawy jakości. Obraz odsumiany jest poprzez przeprowadzenie dedykowanej filtracji anizotropowej (Rozdział 4.3) z wykorzystaniem wartości kierunkowych wyznaczonych opisywaną metodą maski wzorców.

W oryginalnej pracy [66] maska wzorców (Rys. 4.3) miała zupełnie inne przeznaczenie - była użyta w procedurze lokalizacji punktu referencyjnego. Maskę tą zaadoptowano na potrzeby niniejszej pracy w celu określenia dominującego ukieunkowania listewki skórnej.



Rysunek 4.3: Maska wzorca kierunków.

Maska wzorców wyróżnia osiem kierunków próbkowania, wzdłuż których badane jest zróżnicowanie wartości pikseli w odpowiednich polach (Rys. 4.3). Przyjęto kąty w zakresie od 0° do 157,5°, z krokiem 22,5°. Wynikiem działania jest tzw. dyskretny obraz kierunków.

W celu wyznaczenia dominującego kąta nachylenia listewki skórnej w punkcie obrazu $p_5 = I(x, y)$ analizuje się odpowiednie piksele p_i^j , $j = 0, 1, \dots, 7$, $i = 1, \dots, 5$. Indeks j określa piksele odpowiadające kierunkowi próbkowania od 0° do $157,5^\circ$. Środkowy piksel p_5 , dla którego wyznaczana jest wartość kierunkowa, należy do wszystkich zakresów próbkowania.

Algorytm wyznaczania wartości kierunkowych z wykorzystaniem maski wzorców można przedstawić następująco:

Algorytm 2. Wyznaczanie wartości kierunkowych na podstawie maski wzorców.

Krok 1

Dla każdego piksela $p(x, y)$ obrazu I , na podstawie maski wzorca kierunków (Rys. 4.3), wyznacz w poszczególnych zakresach próbkowania wartości średnich harmonicznich h_j oraz wartości różnicowania pikseli d_j :

$$h_j = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{1}{p_i^j}, \quad j = 0, 1, \dots, 7, \quad (4.3)$$

$$d_j = \sum_{i=1}^5 |h_j - p_i^j|, \quad j = 0, 1, \dots, 7 \quad (4.4)$$

Zbiór wartości różnicowania d_j tworzy obraz D_j o rozmiarach $N \times M$.

Krok 2

W celu odsumienia obrazu różnicowania wartości d_j wykonaj splot z dolnoprzepustowym filtrem fm , o charakterystyce gaussowskiej:

$$\bar{d}_j(x, y) = d_j(x, y) * fm, \quad j = 0, 1, \dots, 7, \quad (4.5)$$

gdzie:

$$fm = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Optymalna charakterystyka filtra fm została dobrana eksperymentalnie.

Splot (4.5) wyznaczony został na podstawie wzoru (A.1) opisanego w skorowidzu.

Efektom splatania jest obraz różnicowania, zawierający odsumione wartości \bar{d}_j .

Krok 3

Minimalna wartość, z wyznaczonych zróżnicowań $\bar{d}_j(x, y)$, określa dominujący kąt θ_{ds} nachylenia listewki skórnej w punkcie $p(x, y)$:

$$\theta_{ds}(x, y) = \frac{\pi}{8} \cdot z_{min}(x, y) \quad (4.7)$$

gdzie:

$$z_{min}(x, y) = \arg(\min_j \{\bar{d}_j(x, y), j = 0, 1, \dots, 7\}) \quad (4.8)$$

Wyznaczone wartości kierunkowe można przedstawić w skali szarości w postaci obrazu kierunków (Rys. 4.4). Kątowi 0° odpowiada kolor czarny, a kolejnym wartościom kierunkowym odpowiadają coraz jaśniejsze odcienie. Kątowi $157,5^\circ$ odpowiada kolor biały.



Rysunek 4.4: a) Obraz linii papilarnych, b) obraz kierunków przedstawiony w skali szarości

Tak wyznaczony obraz kierunków może być mocno zaszumiony, co przedstawiono na Rys. 4.4b. Z tego powodu opracowana została metoda poprawy jakości tego typu obrazów. Wyznaczony obraz kierunków (Rys. 4.4b) dekomponowany jest na osiem podobrazów, każdy z jedną składową kierunkową (Rys. 4.5). Każdy podobraz jest rozmywany filtrem Gaussa (4.11), a następnie dokonywana jest rekonstrukcja obrazu kierunków (Rys. 4.6).

Algorytm poprawy jakości obrazu kierunków można opisać następująco:

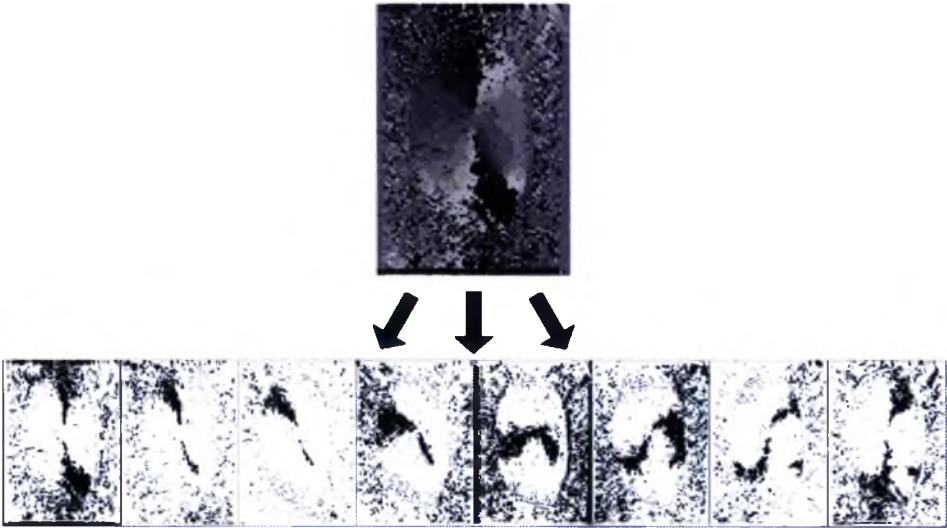
Algorytm 3. *Poprawa jakości dyskretnego obrazu kierunków.*

Krok 1

Podziel obraz kierunków na osiem binarnych podobrazów składowych kierunkowych:

$$z_j(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } z_{\min}(x, y) = j \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases}, \quad j = 0, 1, \dots, 7 \quad (4.9)$$

W wyniku operacji (4.9) każdy z obrazów z_j przedstawia jedną z wartości kierunkowych j , a pozostałe wartości kierunkowe stanowią tło obrazu. Przykładową dekompozycję obrazu kierunków przedstawiono na Rys. 4.5.



Rysunek 4.5: Dekompozycja obrazu kierunków na osiem podobrazów z_j składowych kierunkowych.

Krok 2

Rozmyj każdy z podobrazów z_j filtrem Gaussa fg :

$$\bar{z}_j(x, y) = z_j(x, y) * fg \quad (4.10)$$

gdzie wartości pikseli maski fg można wyznaczyć korzystając z:

$$fg(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(u^2+v^2)/(2\sigma^2)} \quad (4.11)$$

Wartość parametru $\sigma = 20$, została ustalona dla obrazów zapisanych w rozdzielczości 500dpi, co jest standardową rozdzielczością systemów AFIS.

Parametry maski fg powinny być tak dobrane, aby ziarnista struktura podobrazów kierunkowych została całkowicie rozmyta (Rys. 4.6). W celu zmniejszenia liczby obliczeń, wykorzystano szybki algorytm rozmywania (ang. *Fast Gaussian Blur*) [33].

Krok 3

Na podstawie wartości pikseli rozmytych obrazów \bar{z}_j dokonaj złożenia obrazu kierunków.

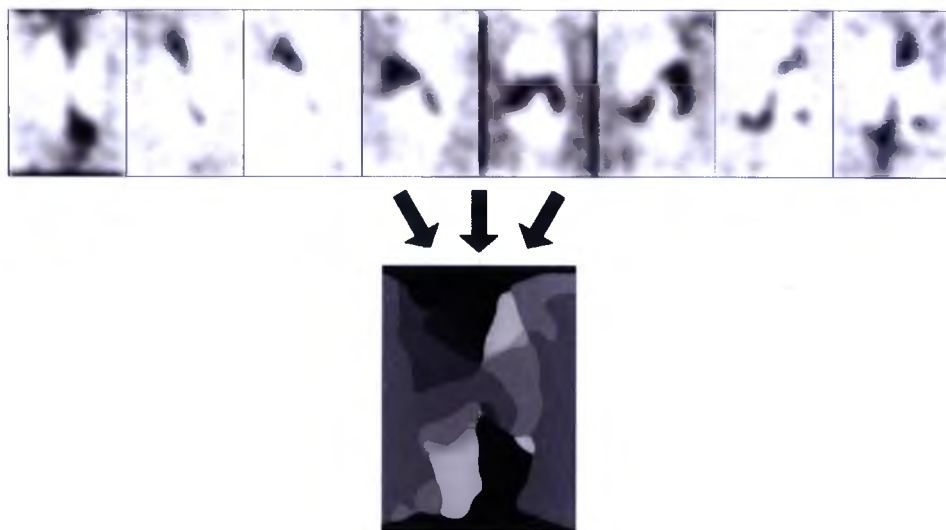
Dla każdego punktu $p(x, y)$ poszukiwany jest argument $j = 0, 1, \dots, 7$ obrazu, który zawiera najmniejszą wartość $\bar{z}_j(x, y)$. Wyznacz odsumiony obraz kierunków:

$$\bar{\theta}_{ds}(x, y) = \frac{\pi}{8} \cdot \bar{z}_{min}(x, y) \quad (4.12)$$

gdzie:

$$\bar{z}_{min}(x, y) = \arg(\min_j \{\bar{z}_j(x, y), j = 0, 1, \dots, 7\}) \quad (4.13)$$

Przykładowe złożenie obrazu kierunków przedstawiono na Rys. 4.6.

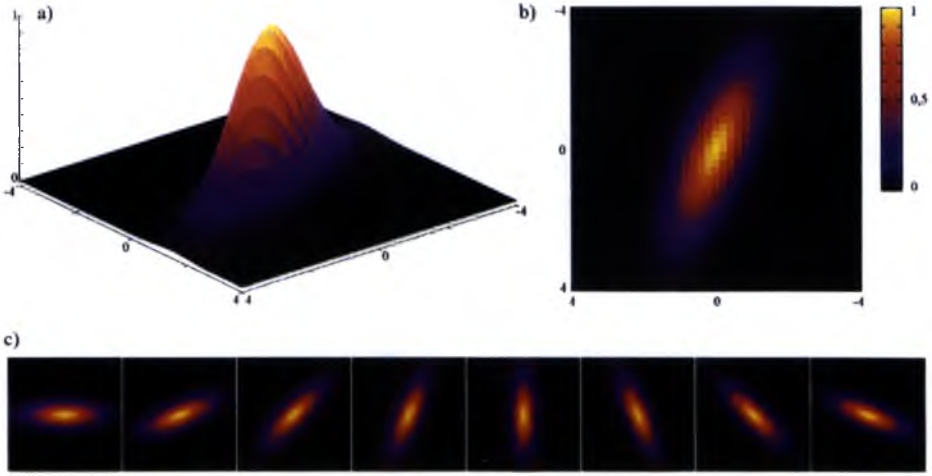


Rysunek 4.6: Złożenie obrazu kierunków z ośmiu podobrazów \bar{z}_j rozmytych filtrem Gaussa.

4.3 Filtracja anizotropowa

Filtr anizotropowy o charakterystyce gaussowskiej ma na celu redukcję szumów na obrazie linii papilarnych. W filtracji anizotropowej wykorzystuje się maskę (Rys. 4.7), której kształt jest odpowiednio dopasowywany do przebiegu linii papilarnych.

Podobne podejście zostało zaprezentowane przez Honga, Wana i Jaina [52], w metodzie wykorzystującej filtr Gabora. Zastosowanie filtracji Gabora jest jednak bardziej kosztowne obliczeniowo w porównaniu do opisywanej metody filtracji anizotropowej.



Rysunek 4.7: Maska anizotropowego filtru o charakterystyce gaussowskiej. a) Rzut izometryczny maski dla wartości: $\sigma_x = 10$, $\sigma_y = 90$, $\theta = 67,5^\circ$, b) oraz rzut z góry. c) Rzut z góry ośmiu masek, dla wartości θ zmieniającej się od 0° , do $157,5^\circ$ z krokiem $22,5^\circ$.

W ogólnej postaci poszczególne wartości maski filtru anizotropowego można wyznaczyć w sposób następujący:

$$fa(u, v, \theta) = \exp \left(-\pi \left(\frac{(u\Psi_c + v\Psi_s)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(-u\Psi_s + v\Psi_c)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right) \quad (4.14)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \Psi_c &= \cos \theta(u, v) \\ \Psi_s &= \sin \theta(u, v) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Stosunek wartości σ_x do σ_y określa stopień kierunkowości (spłaszczenia) filtru, a wartość θ określa kąt nachylenia filtru. W szczególnym przypadku, gdy wartości

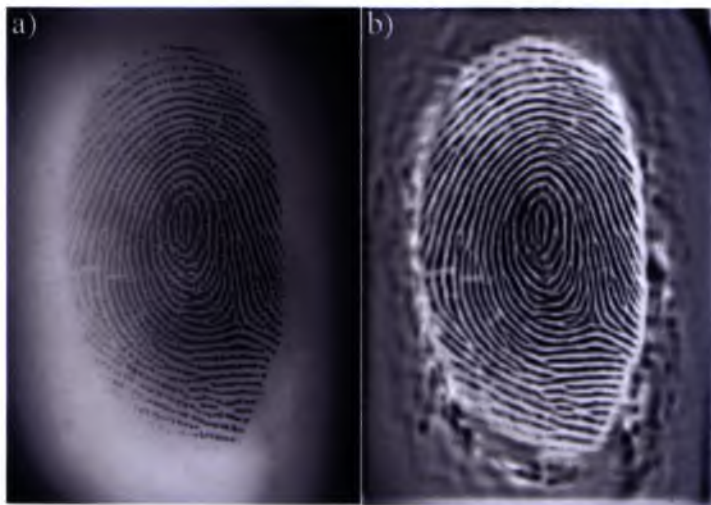
$\sigma_x = \sigma_y$, wynikowa maska określać będzie dolnoprzepustowy, symetryczny filtr Gaussa.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów przyjęto wartości $\sigma_x = 10$ oraz $\sigma_y = 90$. Rozmiar okna maski $B \times B$ wynosi 9×9 i został dobrany tak, aby obszar okna maski obejmował tylko jedną listewkę skórną. Zasada doboru rozmiaru maski została opisana szczegółowo w Rozdziale 5.4.1.

Zgodnie z (A.1) opracowaną w rozprawie filtrację anizotropową można zapisać w następujący sposób:

$$I_{aniz}(x, y) = I_{norm}(x, y) * fa(\bar{\theta}_{ds}(x, y)) \quad (4.16)$$

W wyniku przeprowadzenia operacji (4.16) dla wszystkich pikseli obrazu I_{norm} otrzymywany jest odsumiony obraz linii papilarnych. Wygładzanie obrazu odbywa się wzdłuż przebiegu listewek skórných na podstawie wartości dyskretnego obrazu kierunków (Rys. 4.8).

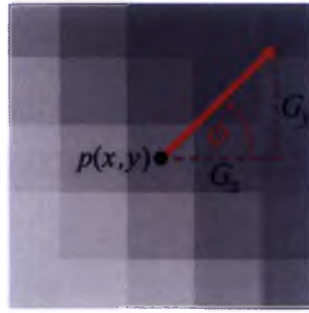


Rysunek 4.8: a) Obraz linii papilarnych, b) wynik filtracji anizotropowej znormalizowanego obrazu.

4.4 Obraz kierunków wyznaczany metodą gradientową

Ze względu na dokładność, najpopularniejszą metodą wyznaczania obrazu kierunków linii papilarnych, jest metoda gradientowa [70]. W metodzie gradientowej wartości kierunkowe obrazu (Rys. 4.10b) wyznaczane są na podstawie wartości zmian gradientu pikseli (pochodnych kierunkowych), które można zobrazować w postaci pola wektorowego (Rys. 4.10a). Wektory pola zaczepione w każdym punkcie obrazu wskazują kierunek i wartość najszybszego wzrostu danej skalarnej (Rys. 4.9). Moduł wektora utożsamiany jest z szybkością wzrostu gradientu, a zwrot wektora odpowiada kierunkowi zmian.

Gradient $\nabla I_{aniz}(x, y)$ w dowolnym punkcie $p(x, y)$ obrazu I_{aniz} opisany jest dwuwymiarowym wektorem $[G_x(x, y), G_y(x, y)]^T$.



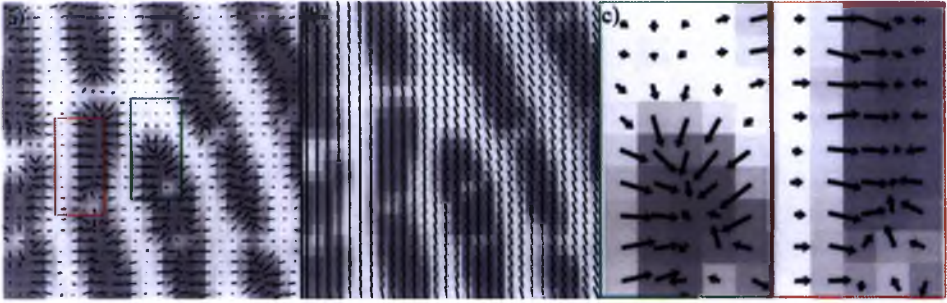
Rysunek 4.9: a) Wektor gradientu ∇I_{aniz} w punkcie $p(x, y)$. Kąt ϕ określa kierunek zmian gradientu.

Wektory gradientów są prostopadłe do przebiegu listewki skórnej, z wyjątkiem obszarów występowania zakończeń listewek skórnych (Rys. 4.10c). Z tego powodu lokalna wartość obrazu kierunków wyznaczana jest na podstawie uśrednionego kierunku zmian gradientu w pewnym otoczeniu punktu $p(x, y)$ obrazu I_{aniz} .

Definicja 4.1. Dwuwymiarowy wektor gradientu zmian jasności pikseli obrazu zdefiniowany jest w następujący sposób [13, 121]:

$$\begin{bmatrix} G_x(x, y) \\ G_y(x, y) \end{bmatrix} = \text{sign}(G_x) \nabla I_{aniz}(x, y) = \text{sign}\left(\frac{\partial I_{aniz}(x, y)}{\partial x}\right) \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{aniz}(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I_{aniz}(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Omawiana metoda wyznaczania obrazu kierunków wymaga uśredniania wartości gradientowych. Gradienty, znajdujące się po przeciwnych stronach listewki



Rysunek 4.10: Powiększony wycinek obrazu linii papilarnych, a) pole wektorowe odpowiadające lokalnym zmianom gradientu, b) reprezentacja wartości kierunkowych w postaci odcinków, c) pole wektorowe w obszarze zakończenia listewki skórnej - kolor zielony, pole wektorowe wzdłuż przebiegu listewki skórnej - kolor czerwony.

skórnej, są przeciwnie skierowane, co może powodować, że uśredniona wartość modułu wektora może być bardzo mała (w szczególności zerowa). Uniemożliwia to wskazanie poprawnego kierunku listewki skórnej. Rozwiązanie tego problemu zostało przedstawione przez Kassa i Witkina w pracy [70], gdzie średnie wartości gradientów wyznacza się w ustalonym otoczeniu okna W z zależności:

$$\begin{bmatrix} \overline{G_{sx}} \\ \overline{G_{sy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_W (G_x^2 - G_y^2) \\ \sum_W 2G_x G_y \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Kąt $\overline{\phi}$ zmian gradientów w oknie W zawiera się w przedziale $-\frac{\pi}{2} < \overline{\phi} \leq \frac{\pi}{2}$. Wartość średnią kąta $\overline{\phi}$ wyznacza się z zależności:

$$\overline{\phi} = \frac{1}{2} \angle(\overline{G_{sx}}, \overline{G_{sy}}) \quad (4.19)$$

gdzie operator $\angle(u, v)$ jest zdefiniowany następująco:

$$\angle(u, v) = \begin{cases} \text{tg}^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) & u \geq 0 \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) + \pi & \text{dla } u < 0 \wedge v \geq 0 \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) - \pi & u < 0 \wedge v < 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

Ponieważ wektory gradientów są prostopadłe do przebiegu listewek skórnych, kąt θ nachylenia listewki skórnej wyznaczany jest na podstawie formuły:

$$\theta = \begin{cases} \overline{\phi} + \frac{1}{2}\pi & \text{dla } \overline{\phi} \leq 0 \\ \overline{\phi} - \frac{1}{2}\pi & \text{dla } \overline{\phi} > 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

W pracy [70] nie uwzględniono jednak, że dla warunku $G_x = G_y \neq 0$, wyznaczona wartość kąta ϕ jest błędna (przesunięta o wartość $\pi/2$). Z uwagi

na ten błąd zaproponowano modyfikację wartości gradientu G_x , losowo zwiększając lub zmniejszając ją o 1 w przypadku wystąpienia podanego powyżej warunku równości gradientów.

W praktyce, wartości gradientów (4.17) są wyznaczane z masek detekcji krawędzi. Na potrzeby niniejszej pracy porównano dokładność wyznaczania kierunków listewek skórnych z wykorzystaniem masek: gradientu [98], Sobela [39, 68], Prewitta [98] i Scharra [64]. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w Rozdziale 5.4.2 najbardziej zgodne ze wskazaniami policyjnego eksperta były wyniki uzyskiwane przy użyciu maski Sobela.

Kierunkowe maski Sobela - S_x oraz S_y mają postać:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Maska S_x odpowiada gradientowi G_x , a maska S_y gradientowi G_y .

Algorytm wyznaczania obrazu kierunków opisać można w zwartej formie następująco:

Algorytm 4. Wyznaczanie wartości obrazu kierunków na podstawie zmian gradientów.

Krok 1

Wyznacz poziome G_x i pionowe G_y składniki wektora gradientu $\nabla I_{aniz}(x, y)$, wykorzystując do tego celu maski Sobela (4.22).

Jeśli otrzymane wartości gradientów są niezerowe oraz równe sobie, losowo zwiększ lub zmniejsz wartość gradientu G_x o 1:

$$\forall_{G_x, G_y} (G_x \neq 0 \wedge G_y \neq 0 \wedge (G_x = G_y) : G_x \pm 1) \quad (4.23)$$

Krok 2

Dla każdego piksela $p(x, y)$ obrazu I_{aniz} wyznacz kąt nachylenia θ_{gr} listewki skórnej (Definicja 2.6), w następujący sposób:

$$\overline{G}_{sy}(x, y) = \sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} 2G_x(x+i, y+j)G_y(x+i, y+j) \quad (4.24)$$

$$\overline{G}_{sx}(x, y) = \sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} (G_x(x+i, y+j)^2 - G_y(x+i, y+j)^2) \quad (4.25)$$

$$\bar{\phi}(x, y) = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\bar{G}_{sy}(x, y)}{\bar{G}_{sx}(x, y)} \quad (4.26)$$

$$\theta_{gr}(x, y) = \bar{\phi}(x, y) + k\pi \quad (4.27)$$

gdzie:

$$k = \begin{cases} \frac{1}{2} & (\bar{\phi}(x, y) < 0 \wedge \bar{G}_{sy}(x, y) < 0) \vee (\bar{\phi}(x, y) \geq 0 \wedge \bar{G}_{sy}(x, y) > 0) \\ 1 & \text{dla } \bar{\phi}(x, y) < 0 \wedge \bar{G}_{sy}(x, y) \geq 0 \\ 0 & \bar{\phi}(x, y) \geq 0 \wedge \bar{G}_{sy}(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (4.28)$$

Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że dla obrazów w rozdzielczości 500dpi okno W (4.24-4.25) powinno mieć rozmiar $\omega \times \omega = 17 \times 17$. Rozdzielczość taka wynika z wymogów systemów AFIS. Szczegółowy opis doboru parametrów algorytmów został zawarty w Rozdziale 5.4.1.

Wyznaczone wartości kierunkowe (4.27) mogą posiadać pionowe i poziome artefakty wynikające z uśredniania działającego okna W (Rys. 4.11b). Z tego względu występuje potrzeba dodatkowej filtracji obrazu kierunków. Filtracja wykonywana jest za pomocą ważonego uśredniania na podstawie spójności wartości kierunkowych. Spójność obrazu kierunków określa stopień zróżnicowania wartości kierunkowych w oknie W .

Spójność obrazu kierunków można wyznaczyć następująco:

Algorytm 5. Wyznaczanie spójności obrazu kierunków i poprawa jego jakości.

Krok 1

Wyznacz zróżnicowanie wartości kierunkowych w obrębie okna W :

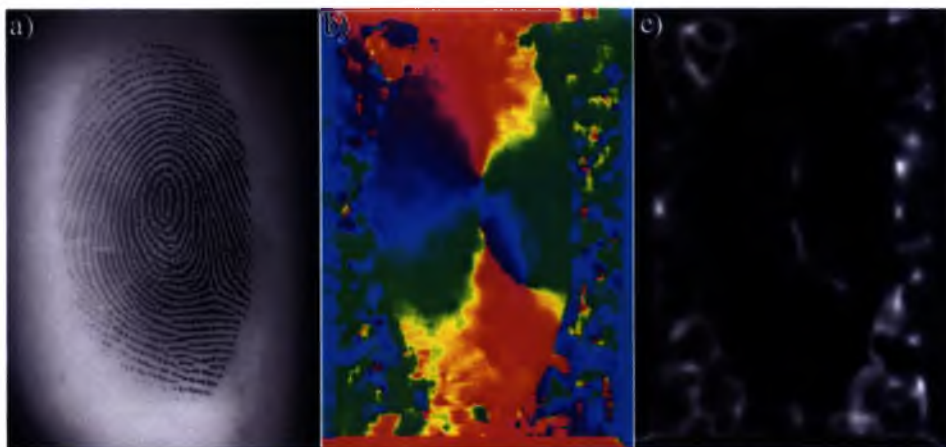
$$Od(x, y) = \sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} |\theta_{gr}(x, y) - \theta_{gr}(x + u, y + v)| \quad (4.29)$$

Krok 2

Wyznacz współczynnik spójności obrazu kierunków w oknie W :

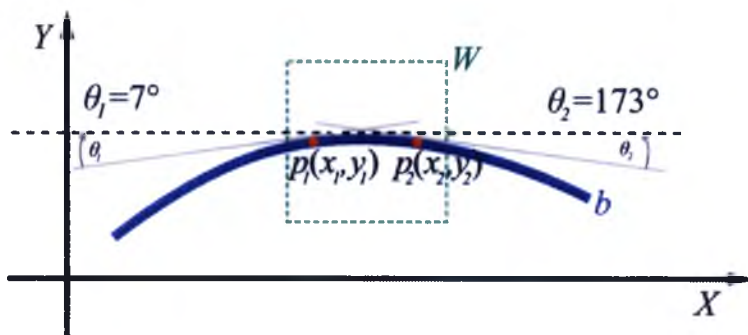
$$Cn(x, y) = \frac{\omega}{\sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} \frac{1}{Od(x+u, y+v)}} \quad (4.30)$$

Wartości współczynnika Cn określają stopień zróżnicowania (zaszumienia) wartości kierunkowych. Spójność obrazu kierunków przedstawiono na Rys. 4.11c, gdzie wartości Cn zostały znormalizowane do przedziału 0-255.



Rysunek 4.11: a) Obraz linii papilarnych, b) obraz kierunków wyznaczony metodą gradientową, c) spójność obrazu kierunków.

Wartości obrazu kierunków są modularne w zakresie $[0, \pi)$. Bezpośrednie uśrednianie obrazu kierunków (Rys. 4.11b) może prowadzić do błędnych wyników. Przykładowo, niech dwa punkty listewki skórnej będą ułożone tak, jak na Rys. 4.12.



Rysunek 4.12: Kąty θ_1 i θ_2 nachylenia listewki skórnej b do osi OX .

Średnia arytmetyczna kątów ukierunkowania listewki wyznaczona w obrębie okna W dla kątów θ_1 i θ_2 wynosi 90° , jednak prawidłowa wartość średniej wynosi 0° , gdyż przebieg listewki jest w oknie W prawie poziomy.

Z tego względu uśrednianie obrazu kierunków jest przeprowadzane w oknie W oddzielnie dla składowej sinusowej i kosinusowej kątów nachylenia θ_{gr} :

$$Sc(x, y) = \frac{\sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} \frac{\sin(2\theta_{gr}(u, v))}{Cn(u, v)}}{\sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} \frac{1}{Cn(u, v)}} \quad (4.31)$$

$$Cc(x, y) = \frac{\sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} \frac{\cos(2\theta_{gr}(u, v))}{Cn(u, v)}}{\sum_{i=-\omega/2}^{\omega/2} \sum_{j=-\omega/2}^{\omega/2} \frac{1}{Cn(u, v)}} \quad (4.32)$$

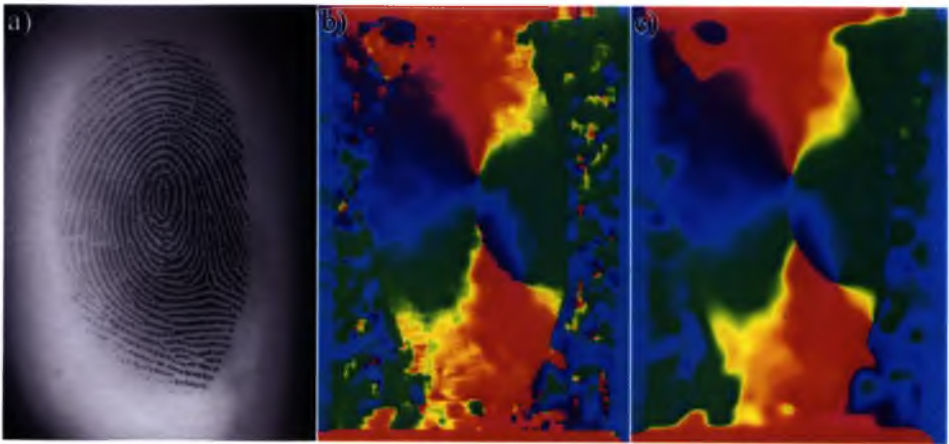
Krok 3

Na podstawie uśrednionych wartości $Sc(x, y)$ oraz $Cc(x, y)$ wyznaczone zostają odsumione wartości kierunkowe $\bar{\theta}(x, y)$:

$$\bar{\theta}(x, y) = \begin{cases} a + \pi & \text{jeżeli } a < 0 \\ a & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.33)$$

gdzie:

$$a = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{Sc(x, y)}{Cc(x, y)} \right) \quad (4.34)$$



Rysunek 4.13: Oryginalny obraz linii papilarnych, b) wyznaczony metodą gradientową obraz kierunków przed filtracją, c) obraz kierunków po wykonaniu filtracji.

W wyniku badań eksperymentalnych ustalono, że dwukrotne przeprowadzenie filtracji w oknie W o rozmiarach 9×9 daje równie dobre rezultaty redukcji szumu obrazu kierunków jak jednokrotna filtracja z zastosowaniem większego okna o rozmiarach 17×17 . Mniejsze rozmiary okna W pozwalają na zachowanie prawidłowych wartości obrazu kierunków w obszarach o dużej krzywiźnie listewek skórnych. W efekcie obraz kierunków w otoczeniu punktu referencyjnego i delt (co przedstawiono na Rys. 2.1) jest bardziej zbliżony do rzeczywistego (wskazanego przez eksperta). Operację (4.33) należy więc wykonać dwukrotnie, przyjmując że w drugim przebiegu algorytmu, wartości obrazu kierunków $\theta_{gr}(x, y)$ we wzorach (4.31 - 4.32) są zastępowane wartościami $\bar{\theta}(x, y)$ wyznaczonymi w pierwszym przebiegu algorytmu. Wynik tak przeprowadzonej filtracji obrazu kierunków został przedstawiony na Rys. 4.13c.

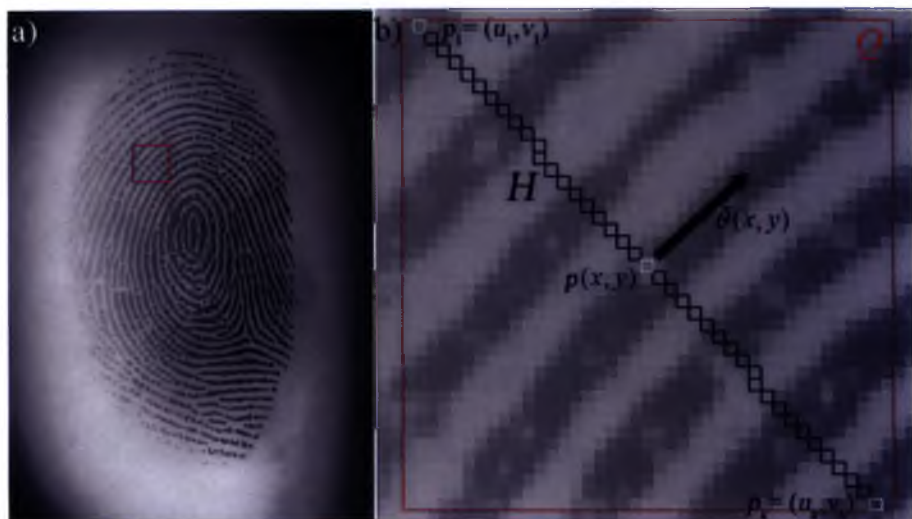
4.5 Wyznaczanie częstości występowania listewek skórnych

Zgodnie z Definicją 2.7 lokalna częstość f występowania listewek skórnych w punkcie $p(x, y)$ obrazu linii papilarnych I_{aniz} wyznaczana jest w otoczeniu tego punktu na podstawie średniej odległości pomiędzy grzbietami i bruzdami listewek skórnych.

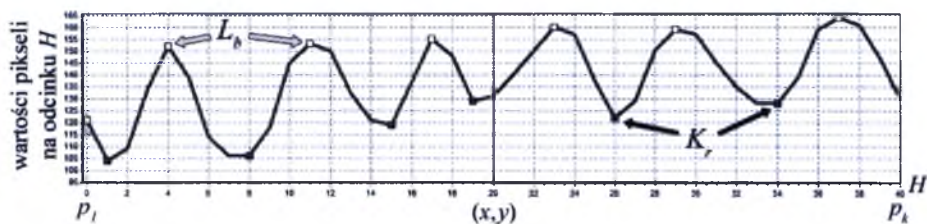
Niech na odcinku H prostopadłym do przebiegu wybranej listewki skórnej znajduje się ciąg leżących obok siebie pikseli p_1, p_2, \dots, p_k (Rys. 4.14b). Odcinek H ograniczony jest oknem Q o wymiarach $k \times k$. W badaniach eksperymentalnych, przedstawionych w Rozdziale 5.4.1 ustalono, że najlepszą wartością parametru k jest liczba 41. Okno Q obejmie w takim przypadku nie mniej niż 3 (średnio 5) bezpośrednio sąsiadujące ze sobą listewki skórne.

Rozkład pikseli na odcinku H można przedstawić w postaci wykresu (Rys. 4.15). Położenie grzbietów i bruzd listewek skórnych odpowiada wszystkim wystąpieniom lokalnych minimów K_r i maksimów L_b na wykresie.

Wyznaczanie częstości występowania listewek skórnych można zapisać następująco:



Rysunek 4.14: a) Obraz linii papilarnych z zaznaczonym obszarem zainteresowania Q , b) Powiększone okno Q z zaznaczonym odcinkiem H badanego ciągu pikseli.



Rysunek 4.15: Rozkład wartości pikseli ulokowanych na odcinku H . Punkty białe - maksima lokalne L_b (bruzdy), punkty czarne - minima lokalne K_r (listewki skórne).

Algorytm 6.

Wyznaczanie częstości występowania listewek skórnych.

Krok 1

Dla każdego piksela $p(x,y)$ obrazu I_{aniz} w oknie Q wyznacz początkowy $p(u_1, v_1)$ i końcowy $p(u_k, v_k)$ punkt odcinka H , prostopadłego do przebiegu li-

stewek skórnych:

$$\begin{aligned} u_1 &= \begin{cases} x - \|\frac{k}{2}\| & \text{dla } \frac{\pi}{4} < \bar{\theta}(x, y) < \pi - \frac{\pi}{4} \\ x + Of' & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ v_1 &= \begin{cases} y - Of'' & \text{dla } \frac{\pi}{4} < \bar{\theta}(x, y) < \pi - \frac{\pi}{4} \\ y - \|\frac{k}{2}\| & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} u_k &= \begin{cases} x + \|\frac{k}{2}\| & \text{dla } \frac{\pi}{4} < \bar{\theta}(x, y) < \pi - \frac{\pi}{4} \\ x - Of' & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ v_k &= \begin{cases} y + Of'' & \text{dla } \frac{\pi}{4} < \bar{\theta}(x, y) < \pi - \frac{\pi}{4} \\ y + \|\frac{k}{2}\| & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.36)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} Of' &= \|\frac{k}{2} \tan(\bar{\theta}(x, y))\|, \\ Of'' &= \|\frac{k}{2} \tan(\bar{\theta}(x, y) + \frac{\pi}{2})\| \end{aligned} \quad (4.37)$$

Krok 2

Za pomocą algorytmu rasteryzacji odcinków, wyznacz ciąg pikseli tworzących odcinek H na obrazie I , o początku w punkcie (u_1, v_1) i końcu w punkcie (u_k, v_k) . Środek odcinka H ma współrzędne (x, y) (Rys. 4.14b).

Jako algorytm rasteryzacji zastosowano algorytm Bresenhama [18]. Z algorytmu rasteryzacji wynika, że niezależnie od nachylenia odcinka H liczba pikseli k znajdujących się na odcinku wynosi 41.

Krok 3

Wyznacz na wykresie (Rys. 4.15 - ciąg pikseli na odcinku H) punkty przegięcia - minima i maksima lokalne. Położenie minimów lokalnych $K_r, r = 1, 2, \dots, \kappa$ - odpowiada listewkom skórny, a maksimów lokalnych $L_b, b = 1, 2, \dots, \gamma$ - odpowiada dolinom pomiędzy listewkami (bruzdy). Wartości K_r i L_b określają numer piksela na odcinku H :

$$\begin{aligned} K_r, L_b &\in \{1, 2, \dots, k\}, k \in \mathbb{N}, \\ K_1 &< K_2 < \dots < K_r, \\ L_1 &< L_2 < \dots < L_b \end{aligned} \quad (4.38)$$

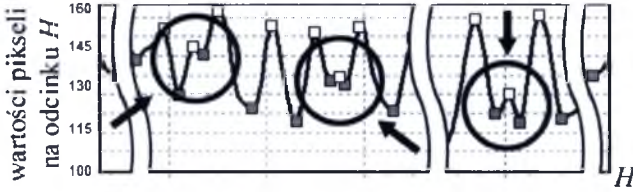
Krok 4

Wyznacz odległości pomiędzy parami punktów tego samego typu:

$$\begin{aligned} Dk_r &= K_r - K_{r+1}, r = 1, 2, \dots, \kappa - 1, \\ Dl_b &= L_b - L_{b+1}, b = 1, 2, \dots, \gamma - 1, \end{aligned} \quad (4.39)$$

Krok 5

Z powodu artefaktów występujących na obrazie linii papilarnych (np. rany, pęknięcia naskórka, gruczoły potowe, itp.) maksima lub minima lokalne, a zarazem odległości pomiędzy nimi, mogą być nieprawidłowo wyznaczone. Przypadek taki pokazano na Rys. 4.16.



Rysunek 4.16: Błędnie wyznaczone minima i maksima lokalne w miejscach występowania artefaktów obrazu linii papilarnych.

Wpływ artefaktów należy wyeliminować, korygując błędnie wyznaczone wartości. Odbywa się to poprzez wzajemne porównanie wyznaczonych odległości, co pozwala na wyznaczenie zbyt małych (nieprawidłowych) odległości pomiędzy punktami K_r i L_b . Procedura eliminacji nieprawidłowo wyznaczonych punktów przebiega następująco:

$$\begin{aligned} \forall D_{K_r} \left(\left(\sum_{j=1}^{\kappa} \delta_k(r, j) \right) > \frac{\kappa}{2} : D_{K_r} + D_{K_{r+1}}, \text{usuń: } D_{K_{r+1}}, \kappa = \kappa - 1 \right), r = 1, 2, \dots, \kappa \\ \forall D_{L_b} \left(\left(\sum_{j=1}^{\gamma} \delta_l(b, j) \right) > \frac{\gamma}{2} : D_{L_b} + D_{L_{b+1}}, \text{usuń: } D_{L_{b+1}}, \gamma = \gamma - 1 \right), b = 1, 2, \dots, \gamma \end{aligned} \quad (4.40)$$

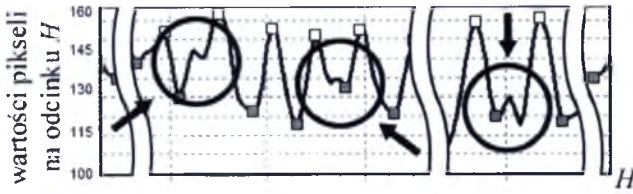
gdzie:

$$\delta_x(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } |Dx_j - Dx_i| > |Dx_j + Dx_{j+1} - Dx_i| \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.41)$$

Wynikiem operacji (4.39 - 4.40) jest poprawiony wykres przebiegu listewek i bruzd (Rys. 4.17).

Krok 6

Na podstawie wyliczonych w Kroku 5 wartości, wyznacz lokalną częstość f występowania listewek skórnych w każdym punkcie $p(x, y)$ obrazu linii papilar-



Rysunek 4.17: Prawdłowo ustalone minima i maksima lokalne po wyeliminowaniu wpływu występujących na obrazie artefaktów.

nych:

$$f(x, y) = \frac{\frac{\kappa + \gamma - 2}{\sum_{r=1}^{\kappa} \frac{1}{Dkr} + \sum_{b=1}^{\gamma} \frac{1}{Dlb}}}{k} \sqrt{Of(x, y)^2 + k^2} \quad (4.42)$$

gdzie:

$$Of(x, y) = \begin{cases} Of'' & \text{dla } \frac{\pi}{4} < \bar{\theta}(x, y) < \pi - \frac{\pi}{4} \\ Of' & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.43)$$

Ze względu na możliwość wystąpienia zakłóceń w obszarach wystąpień minucji lub niską jakość obrazu linii papilarnych, wyznaczona częstość f wymaga uśredniania. Uśrednianie przeprowadzane jest dla każdego punktu $p(x, y)$ obrazu I_{aniz} w oknie W o rozmiarze $\omega \times \omega = 17 \times 17$:

$$\bar{f}(x, y) = \frac{\omega^2}{\sum_{u=x-\omega/2}^{x+\omega/2} \sum_{v=y-\omega/2}^{y+\omega/2} \frac{1}{f(u, v)}} \quad (4.44)$$

4.6 Segmentacja obrazu linii papilarnych

Opracowana na potrzeby niniejszej rozprawy metoda segmentacji obrazu wykorzystuje informacje o zróżnicowaniu wartości pikseli pomiędzy grzbietami i bruzdami listewek skórnych.

Wyznaczanie położenia grzbietów i bruzd realizuje **Algorytm 6**. Można więc wyznaczyć różnice pomiędzy wartościami pikseli sąsiadujących grzbietów i bruzd listewek skórnych równocześnie z częstością ich występowania.

Metodę wyznaczenia obszaru tła oraz obszaru linii papilarnych można przedstawić następująco:

Algorytm 7. Segmentacja obrazu linii papilarnych.**Krok 1**

Wykonaj splot obrazu I z dolnoprzepustowym filtrem fm (4.6), w celu wyeliminowania wpływu artefaktów na segmentację obrazu. Wynikiem splotu jest rozmyty obraz linii papilarnych I_{blur} .

Krok 2

Dla każdego punktu $p(x, y)$, znając wartości K_r i L_b (Krok 3 Algorytmu 6), wyznacz wartości pikseli obrazu I_{blur} odpowiadające położeniu minimów i maksimów lokalnych na odcinku H . Piksele położone w punktach lokalnych minimów i maksimów tworzą uporządkowany ciąg wartości p_i , $i = 1, 2, \dots, \kappa + \gamma$.

Krok 3

Dla każdego punktu $p(x, y)$ obrazu I_{blur} wyznacz zróżnicowanie ϑ wartości pikseli p_i na odcinku H , zgodnie z formułą:

$$\vartheta(x, y) = \sum_{i=1}^{\kappa+\gamma-1} |p_i - p_{i+1}| \quad (4.45)$$

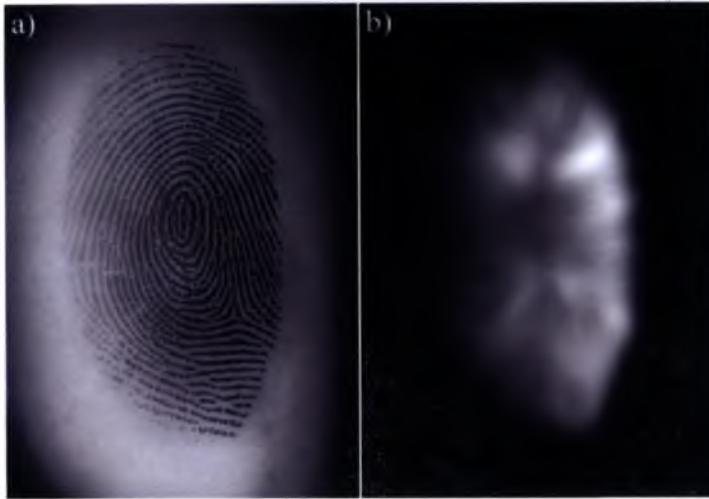
Krok 4

Ze względu na możliwość wystąpienia artefaktów obrazu, wyznaczone wartości zróżnicowania ϑ wymagają uśredniania. Uśrednianie przeprowadzane jest w oknie W o rozmiarze $\omega \times \omega$, zgodnie z formułą:

$$\bar{\vartheta}(x, y) = \frac{\sum_{u=x-\omega/2}^{x+\omega/2} \sum_{v=y-\omega/2}^{y+\omega/2} \vartheta(u, v)}{\omega^2} \quad (4.46)$$

Współczynnik $\bar{\vartheta}(x, y)$ określa stopień zróżnicowania wartości pikseli pomiędzy grzbietami i bruzdami listewek skórnych w otoczeniu punktu $p(x, y)$. Zróżnicowanie można przedstawić w postaci obrazu, co zaprezentowano na Rys. 4.18b, gdzie wartości $\bar{\vartheta}$ zostały znormalizowane do przedziału 0-255.

Obserwując Rys. 4.18b można zauważyć, że nastąpiło wyraźne rozgraniczenie obszarów linii papilarnych i tła. Obszary te należy dokładnie odseparować za pomocą operacji progowania.



Rysunek 4.18: Prawidłowo ustalone minima i maksima lokalne po wyeliminowaniu wpływu występujących na obrazie artefaktów.

Krok 5

Na podstawie wartości różnicowania $\bar{\vartheta}$ wyznacz, za pomocą operacji progowania, rozłączne obszary listewek skórnych oraz tła:

$$Sg(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \vartheta(x, y) > 100 \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.47)$$

Punkty o wartości $Sg(x, y) = 0$ (Rys. 4.19b - kolor czarny) należą do obszaru linii papilarnych, a punkty o wartościach $Sg(x, y) = 1$ należą do obszaru tła.

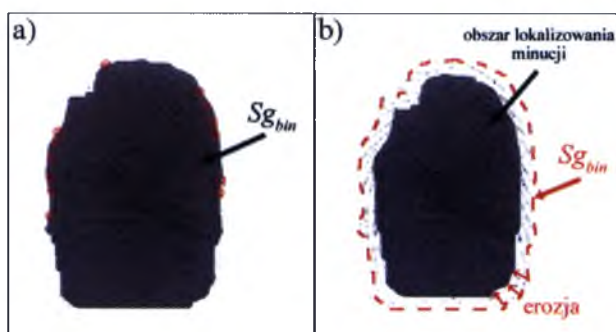
Na krawędzi rozgraniczającej wymienione obszary mogą jednak wystąpić zakłócenia, wynikające z artefaktów (np. pęknięcia lub uszkodzenia naskórka na opuszkach palca lub niski kontrast obrazu) występujących na oryginalnym obrazie linii papilarnych. Przykład takiego obrazu zaprezentowano na Rys. 4.19b. Jest to przypadek rzadko występujący, który jednak musi być uwzględniony w rozważaniach. Wyeliminowanie tego zjawiska wymaga przeprowadzenia po procesie progowania (4.47) operacji iteracyjnej dylatacji, z krokiem 15. Sztucznie powiększony w procesie dylatacji obszar występowania listewek skórnych (Rys. 4.19c - kolor czerwony) musi zostać ponownie doprowadzony do rozmiarów pierwotnych, w celu wyeliminowania tła włączonego od analizy w wyniku dylatacji. Operacja redukcji obszaru występowania listewek skórnych (Rys. 4.19c) przeprowadzana jest w procesie iteracyjnej erozji z krokiem 15. Punkty o wartości $Sg_{bin}(x, y) = 0$ należą do poprawionego obszaru występowania listewek skórnych.

Ze względu na dostępne opisy literaturowe operacji morfologicznych [31, 105, 109], algorytmy dylatacji i erozji nie zostały przedstawiane w rozprawie.



Rysunek 4.19: Obraz linii papilarnych, b) obszar występowania listewek skórnych z zaznaczonymi zakłóceniami, c) wynik przeprowadzonych kolejno operacji dylatacji i erozji z zaznaczonymi obszarami poprawy.

Jednokrotny proces erozji jest niewystarczający, gdyż w obrębie, wyznaczonego w wyniku erozji, obszaru mogą występować krawędziowe obcięcia linii papilarnych. Automatyczne systemy lokalizowania cech charakterystycznych oznaczają wszystkie zakończenia listewek skórnych jako minucje. Grozi to generowaniem minucji fałszywych - niewystępujących faktycznie na obrazie linii papilarnych, co przedstawiono na Rys. 4.20a, gdzie nieprawidłowo wyznaczone minucje oznaczono kolorem czerwonym. To niepożądane zjawisko można wyeliminować, erodując wydzielony obszar kolejny raz, z krokiem iteracji 16.



Rysunek 4.20: a) Błędnie wyznaczone minucje w obszarze występowania listewek skórnych, b) obszar lokalizowania minucji po iteracyjnej erozji z krokiem 16.

Kroki iteracji wymienionych operacji morfologicznych zostały dobrane eksperymentalnie tak, aby uzyskać najlepsze wyniki segmentacji obrazów rejestrowanych w rozdzielczości 500dpi, co jest typowym wymogiem systemów AFIS.

4.7 Binarizacja obrazu linii papilarnych

Proces wyznaczania minucji, opisany w dalszych rozdziałach, wymaga wcześniejszej binaryzacji obrazu. Zastosowana w rozprawie technika binaryzacji wykorzystuje informacje o pikselowym położeniu grzbietów i bruzd listewek skórnych. Sposób wyznaczania współrzędnych pikselowych grzbietów i bruzd został przedstawiony w Rozdziale 4.5 (Rys. 4.14).

W Kroku 2 **Algorytmu 6** wyznaczono współrzędne pikselowe lokalnych minimum K_r , $r = 1, 2, \dots, \kappa$ i maksimum L_b , $b = 1, 2, \dots, \gamma$, odpowiadające położeniu bruzd i listewek skórnych, występujących w ciągu pikseli p_1, p_2, \dots, p_k odcinka H . W wymienionym ciągu występuje $\kappa + \gamma$ naprzemiennie rozłożonych pikseli opisanych deskryptorami K_r-L_b (Rys. 4.15).

W kolejnym kroku, wszystkie piksele ciągu p_1, p_2, \dots, p_k należy odpowiednio zbinaryzować. Można tego dokonać w sposób następujący:

Algorytm 8. *Binarizacja obrazu linii papilarnych.*

Krok 1

Dla każdego piksela $p(x, y)$ obrazu I_{aniz} wyznacz na odcinku H pary pikseli K_r-L_b , gdzie indeksy r i b oznaczają kolejne numery bruzd i listewek, a wartości K_r oraz L_b oznaczają numery pikseli ciągu p_1, p_2, \dots, p_k (patrz **Algorytm 6** - Krok 2).

Krok 2

Dla każdej pary K_r-L_b (Rys. 4.21):

- wyznacz liczbę pikseli leżących pomiędzy bezpośrednio sąsiadującymi ze sobą punktami K_r i L_b :

$$z = K_r - L_b \quad (4.48)$$

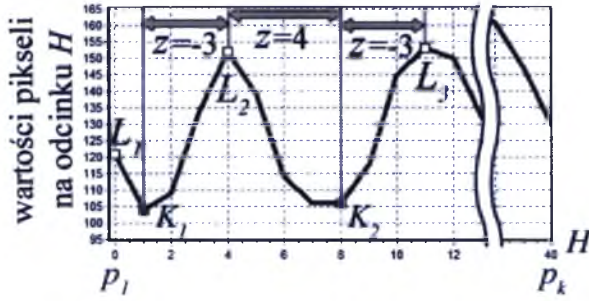
- wyznacz numer środkowego piksela leżącego pomiędzy punktami K_r-L_b :

$$a = K_r + \left\lceil \frac{z}{2} \right\rceil \quad (4.49)$$

Krok 3

Przypisz binarne wartości wszystkim pikseli leżących pomiędzy punktami K_r-L_b :

$$\begin{aligned} [p_i, \dots, p_a] &\rightarrow 0, \\ [p_a, \dots, p_j] &\rightarrow 1, \end{aligned} \quad (4.50)$$



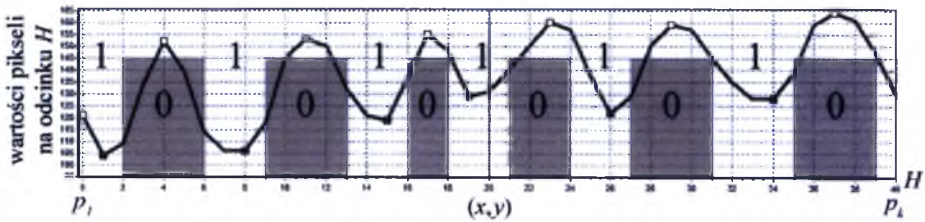
Rysunek 4.21: Trzy kolejne pary K_r-L_b : K_1-L_2 , K_2-L_2 , K_2-L_3 .

gdzie:

$$\begin{aligned} i &= K_r, j = L_b && \text{gdzy } K_r < L_b \\ i &= L_b, j = K_r && \text{w przeciwnym przypadku} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Proces binaryzacji (Kroki 2 i 3) należy powtórzyć dla wszystkich par K_r-L_b odnalezionych na odcinku H .

W wyniku binaryzacji piksele należące do listewki skórnej przyjmują wartość 0, a piksele należące do bruzdy wartość 1 (zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 4.22).

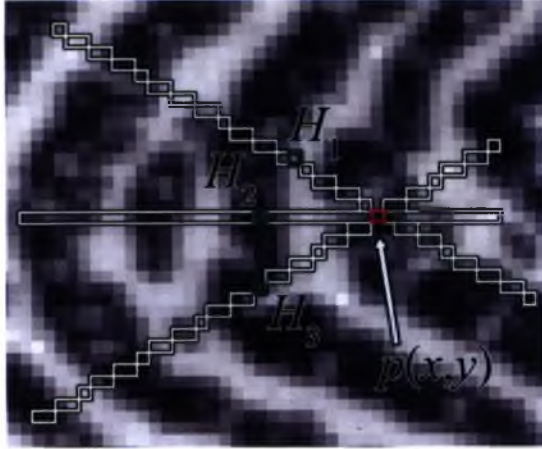


Rysunek 4.22: Wyznaczone w procesie binaryzacji wartości pikseli ułożonych na odcinku H .

Krok 4

Zgodnie z Rys. 4.23 odcinki H , wyznaczone dla różnych punktów obrazu I_{aniz} , mogą się przecinać, a więc pojedynczy piksel $p(x, y)$ obrazu może mieć wielokrotnie wyznaczoną wartość binarną, często różną.

Ostateczna wartość binarna obrazu ustalana jest na podstawie liczby przypisań do punktu $p(x, y)$ wartości 0 do liczby przypisań wartości 1.



Rysunek 4.23: Przecięcie odcinków H w punkcie $p(x, y)$.

Dla każdego punktu $p(x, y)$ wyznacz binarną wartość obrazu $I_{bin}(x, y)$ (Rys. 4.24b), ograniczoną do obszaru występowania listewek skórnych, następująco:

$$I_{bin}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } (V_0(x, y) > V_1(x, y)) \wedge (Sg_{bin}(x, y) = 0) \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.52)$$

gdzie $V_0(x, y)$ jest liczbą przypisań wartości 0 do punktu $p(x, y)$, a $V_1(x, y)$ liczbą takich przypisań o wartości 1. Liczby te zapisane są w tablicach V_0 i V_1 o rozmiarach $N \times M$.

Niska jakość obrazu lub duża liczba minucji zlokalizowanych blisko siebie mogą powodować niepoprawne odwzorowanie listewek skórnych na odseparowanym binarnym obrazie linii papilarnych. Z tego względu binarny obraz I_{bin} wymaga dalszej poprawy jakości. Jakość obrazu może być poprawiona na drodze analizy wartości tablic V_0 i V_1 oraz wartości częstości występowania listewek skórnych \bar{f} (4.44). Jeśli wartość $(V_0(x, y))$ lub $(V_1(x, y))$ skojarzona z punktem $p(x, y)$ nie została określona w Algorytmie 8, to arbitralnie przepisana zostanie jej wartość 0.

Poprawę jakości binarnego obrazu I_{bin} można zrealizować następująco:



Rysunek 4.24: a) Obraz linii papilarnych I , b) zbiniaryzowany obraz I_{bin} linii papilarnych.

Algorytm 9. *Poprawa jakości binarnego obrazu linii papilarnych I_{bin} .*

Krok 1

W celu wyeliminowania wpływu artefaktów mogących wystąpić na obrazie linii papilarnych, wykonaj splot tablic V_0 oraz V_1 z dolnoprzepustowym filtrem fn :

$$\bar{V}_a(x, y) = V_a(x, y) * fn \quad (4.53)$$

gdzie $a = 0, 1$ oraz:

$$fn = \begin{bmatrix} 9 & 12 & 9 \\ 12 & 15 & 12 \\ 9 & 12 & 9 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Wartości maski fn zostały na podstawie zależności (4.11).

Wynikiem filtracji są tablice \bar{V}_0 i \bar{V}_1 o rozmiarach $N \times M$.

Krok 2

Zgodnie z krokiem 1 **Algorytmu 6** dla każdego punktu $p(x, y)$ obrazu I_{bin} wyznacz początek i koniec odcinka H w punktach $p(u_1, v_1)$ oraz $p(u_k, v_k)$.

Krok 3

Poprawiony obraz binarny I_{qual} wyznaczany jest na podstawie analizy rozkładu pikseli znajdujących się na badanej listewce skórnej oraz sąsiadujących listewkach skórnych (Rys. 4.25a) obrazu I_{bin} . Piksele te wyznaczane są na podstawie uśrednionego nachylenia $\bar{\theta}$ oraz średniej częstości występowania listewek skórnych \bar{f} .

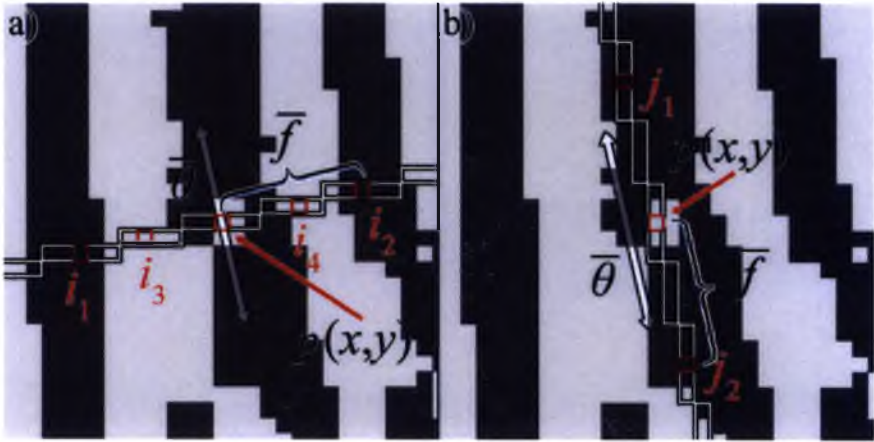
Dla każdego odcinka H o środku w punkcie $p(x, y)$ oraz początku i końcu w punktach $p(u_1, v_1)$ i $p(u_k, v_k)$ wyznacz wartości tablic T_0 oraz T_1 :

$$T_a(x, y) = 3(\bar{V}_a(x, y)) + 2(\bar{V}_a(u_{i_1}, y_{i_1})) + 2(\bar{V}_a(u_{i_2}, v_{i_2})) + (\bar{V}_{1-a}(u_{i_3}, v_{i_3})) + (\bar{V}_{1-a}(u_{i_4}, v_{i_4})) \quad (4.55)$$

gdzie $a = 0, 1$ oraz:

$$\begin{aligned} i_1 &= \lfloor \frac{k}{2} + \frac{\bar{f} \cdot k}{\sqrt{Of(x, y)^2 + k^2}} \rfloor, & i_2 &= \lfloor \frac{k}{2} - \frac{\bar{f} \cdot k}{\sqrt{Of(x, y)^2 + k^2}} \rfloor, \\ i_3 &= \lfloor \frac{k}{2} + \frac{\bar{f} \cdot k}{2\sqrt{Of(x, y)^2 + k^2}} \rfloor, & i_4 &= \lfloor \frac{k}{2} - \frac{\bar{f} \cdot k}{2\sqrt{Of(x, y)^2 + k^2}} \rfloor \end{aligned} \quad (4.56)$$

zmienne we wzorze (4.56) zostały określone w (4.43) - (4.44).



Rysunek 4.25: Piksele (kolor czerwony) wykorzystane do wyznaczenia wartości tablic T_a w punkcie $p(x, y)$, a) prostopadłe do przebiegu listewek skórnych, b) wzdłuż listewek skórnych.

Krok 4

Zgodnie z krokiem 1 **Algorytmu 6** dla każdego punktu $p(x, y)$ obrazu I_{bin} i średniej wartości kąta nachylenia $\bar{\theta} + \pi/2$ listewki skórnej, wyznacz na podstawie wzorów (4.35 - 4.36) współrzędne początku $p(u_1, v_1)$ i końca $p(u_k, v_k)$ odcinka H przebiegającego wzdłuż listewek skórnych (Prostopadłego do standradowo wyznaczonego - patrz Rys. 4.25b).

Krok 5

Dla każdego odcinka H wyznaczonego w Kroku 4 zmodyfikuj wartości elementów tablic T_0 i T_1 , w sposób następujący:

$$T_a(x, y) = T_a(x, y) + 1,5(\bar{V}_a(u_{j_1}, v_{j_1})) + 1,5(\bar{V}_a(u_{j_2}, v_{j_2})) \quad (4.57)$$

gdzie $a = 0, 1$ oraz:

$$j_1 = \lfloor \frac{k}{2} + \frac{\bar{f} \cdot k}{\sqrt{Of(x,y)^2 + k^2}} \rfloor, \quad j_2 = \lfloor \frac{k}{2} - \frac{\bar{f} \cdot k}{\sqrt{Of(x,y)^2 + k^2}} \rfloor, \quad (4.58)$$

Krok 6

Elementy zbinyzowanego obrazu I_{qual} (Rys. 4.26b), będącego poprawioną wersją obrazu binarnego I_{bin} z Rys. 4.24b, wyznaczane są iteracyjnie na podstawie następującej formuły:

$$I_{qual}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{dla } (T_0(x, y) > T_1(x, y)) \wedge (Sg_{bin}(x, y) = 0) \\ 1 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.59)$$

4.8 Lokalizacja minucji

Położenie minucji na obrazie linii papilarnych ustalane jest z wykorzystaniem procesu szkieletyzacji obrazu. W procesie tym listewki skórne o różnej grubości, na binarnym obrazie linii papilarnych, przekształcane są do postaci o jednopikselowej szerokości (Rys. 4.28c). Dalsza analiza obrazu sprowadza się do badania bezpośredniego sąsiedztwa pikseli w celu zlokalizowania zakończeń listewek skórnych.

W wyborze algorytmu szkieletyzacji należy zwrócić uwagę na to, by w wyniku operacji morfologicznych, miejsca zakończeń listewek skórnych nie zmieniały swojego położenia oraz by algorytm generował jak najmniejszą liczbę artefaktów. Na potrzeby niniejszej pracy zaadaptowano zmodyfikowany algorytm szkieletyzacji T. Pavlidisa [94].



Rysunek 4.26: a) Źródłowy obraz linii papilarnych, b) Obraz I_{bin} uzyskany w procesie binaryzacji, c) poprawiony binarny obraz linii papilarnych I_{qual} .

Modyfikacja metody klasycznej pozwoliła na uzyskanie lepszych parametrów szkieletu - zlikwidowane zostały artefakty, które były klasyfikowane jako fałszywe minucje.

Zmodyfikowany algorytm szkieletyzacji obrazu można opisać następująco:

Algorytm 10. Szkieletyzacja obrazu binarnego.

Krok 1

Wygeneruj początkowy obraz szkieletyzacji I_{skel} :

$$I_{skel}^0(x, y) = 1 - I_{qual}(x, y) \quad (4.60)$$

Krok 2

Dla maski z Rys. 4.27 przeprowadź proces szkieletyzacji kolejno cztery razy, używając do tego celu wybranych elementów maski sąsiedztwa p_i , $i = 1, \dots, 4$:

p_5	p_1	p_6
p_2	(x, y)	p_3
p_7	p_4	p_8

Rysunek 4.27: Maski szkieletyzacji.

Dla wybranego elementu maski p_i , sprawdź następującą zależność dla każdego piksela obrazu:

$$I_{thin}^i(x, y) = \begin{cases} I_{skel}^{i-1} & \text{gdy } \left(I_{skel}^{i-1}(x, y) \neq 1 \right) \vee (p_i \neq 0) \\ 2 & \text{gdy } \left(I_{skel}^{i-1}(x, y) = 1 \right) \wedge (p_i = 0) \wedge (w) \\ 3 & \text{gdy } \left(I_{skel}^{i-1}(x, y) = 1 \right) \wedge (p_i = 0) \wedge \neg(w) \end{cases} \quad (4.61)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} w = & (((p_5 > 0) \vee (p_1 > 0) \vee (p_6 > 0)) \wedge (p_2 \neq 1) \wedge (p_3 \neq 1) \wedge ((p_7 > 0) \vee (p_4 > 0) \vee (p_8 > 0))) \\ & \vee \\ & (((p_5 > 0) \vee (p_2 > 0) \vee (p_7 > 0)) \wedge (p_1 \neq 1) \wedge (p_4 \neq 1) \wedge ((p_6 > 0) \vee (p_3 > 0) \vee (p_8 > 0))) \\ & \vee \\ & (((p_5 > 0) \vee (p_2 > 0) \vee (p_7 > 0) \vee (p_4 > 0) \vee (p_8 > 0)) \wedge (p_3 \neq 1) \wedge (p_1 \neq 1) \wedge ((p_6 = 2) \vee (p_6 = 1))) \\ & \vee \\ & (((p_6 > 0) \vee (p_3 > 0) \vee (p_8 > 0) \vee (p_4 > 0) \vee (p_7 > 0)) \wedge (p_1 \neq 1) \wedge (p_2 \neq 1) \wedge ((p_5 = 2) \vee (p_5 = 1))) \\ & \vee \\ & (((p_5 > 0) \vee (p_1 > 0) \vee (p_6 > 0) \vee (p_3 > 0) \vee (p_8 > 0)) \wedge (p_4 \neq 1) \wedge (p_2 \neq 1) \wedge ((p_7 = 2) \vee (p_7 = 1))) \\ & \vee \\ & (((p_7 > 0) \vee (p_2 > 0) \vee (p_5 > 0) \vee (p_1 > 0) \vee (p_6 > 0)) \wedge (p_4 \neq 1) \wedge (p_3 \neq 1) \wedge ((p_8 = 2) \vee (p_8 = 1)))) \end{aligned} \quad (4.62)$$

Następnie, po przeanalizowaniu całego obrazu, pikselom o wartości 3 przypisz wartość tła:

$$I_{skel}^i(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } I_{thin}^i(x, y) = 3 \\ I_{thin}^i(x, y) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.63)$$

Powtarzaj operacje (4.61-4.63) dla wartości $i = 1, \dots, 4$.

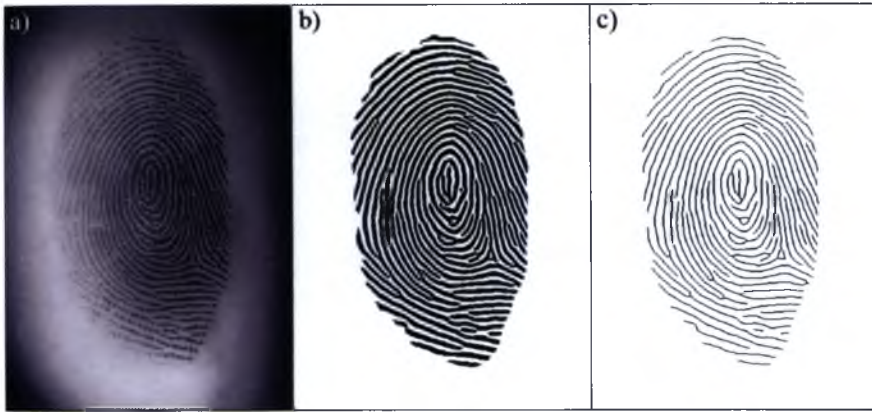
Jeżeli dla dowolnego przebiegu została wyznaczona wartość $I_{thin}^i = 3$, powtórz Krok 2. W przeciwnym przypadku przejdź do Kroku 3.

Krok 3

Znormalizuj wynikowy obraz szkieletyzacji:

$$I_{skel}(x, y) = \frac{|I_{skel}^4(x, y) - 2|}{2} \quad (4.64)$$

Wynik szkieletyzacji obrazu binarnego I_{qual} został przedstawiony na Rys. 4.28.



Rysunek 4.28: a) Źródłowy obraz linii papilarnych, b) Obraz I_{qual} uzyskany w procesie binaryzacji, c) wynikowy obraz I_{skel} szkieletyzacji linii papilarnych.

Lokalizacja minucji na obrazie linii papilarnych wykonywana jest przez wyszukiwanie zakończeń listewek skórnych, oraz zakończeń bruzd (minucji typu rozwidlenie). Z tego względu proces szkieletyzacji przeprowadzany jest dwukrotnie, dla obrazu binarnego I_{qual} oraz jego negatywu (zanegowanych wartości). Pozwala to na optymalizację obliczeń przez wykorzystanie tego samego algorytmu do wyznaczania minucji typu zakończenie oraz minucji typu rozwidlenie.

Algorytm 11. Lokalizacja minucji.

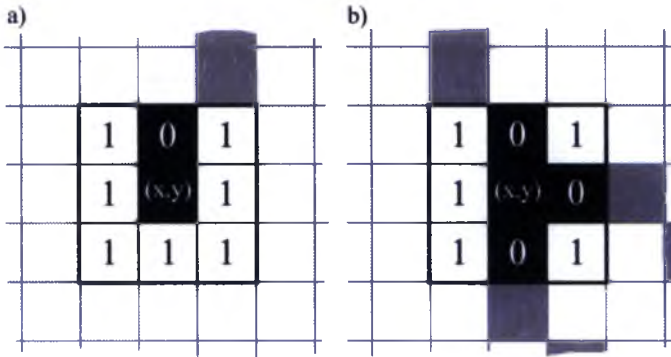
Krok 1

Zgodnie z Algorytmem 10 wykonaj szkieletyzację poprawionego obrazu binarnego I_{qual} oraz utwórz na jego podstawie obraz I_{skel} .

Krok 2

Dla każdego piksela obrazu, spełniającego warunek $I_{skel}(x, y) = 0$ wyznacz liczbę Cn bezpośrednio sąsiadujących z nim pikseli o wartości 0 (Rys. 4.29) [57].

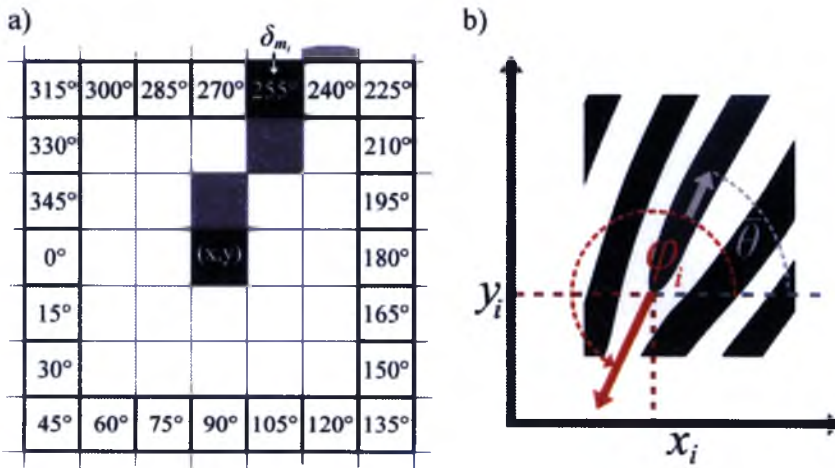
Każdy punkt, dla którego wartość $Cn = 1$ oznacz jako minucję m_i^t typu zakończenie (t - terminatio). Każdy punkt o wartości $Cn = 3$ oznacz jako minucję m_i^b typu rozwidlenie (b - bifurcatio). i określa numer zlokalizowanej minucji.



Rysunek 4.29: Liczba Cn sąsiadujących z punktem (x, y) pikseli spełniających warunek $I_{skel} = 0$: a) $Cn = 1$, b) $Cn = 3$.

Krok 3

Dla każdej minucji m_i^t wyznacz jej kąt φ_i nachylenia do osi OX (Rys. 4.30b). Rzeczywisty kąt φ_i jest estymowany przy pomocy pomocniczej maski (Rys. 4.30a). Miejsce przejścia listewki skórnej przez krawędź maski określa przybliżony kąt δ_{m_i} nachylenia minucji względem osi OX .



Rysunek 4.30: a) Maska określająca przybliżony kąt δ_{m_i} nachylenia minucji względem osi OX . b) Rzeczywisty kąt nachylenia minucji $\varphi_i = 246^\circ$, wyznaczony na podstawie wartości kąta $\bar{\theta}(x_i, y_i)$.

Dla każdej wyznaczonej minucji m_i^t (typ t), wyznacz za pomocą maski (Rys. 4.30) rzeczywisty kąt φ_i nachylenia minucji do osi OX :

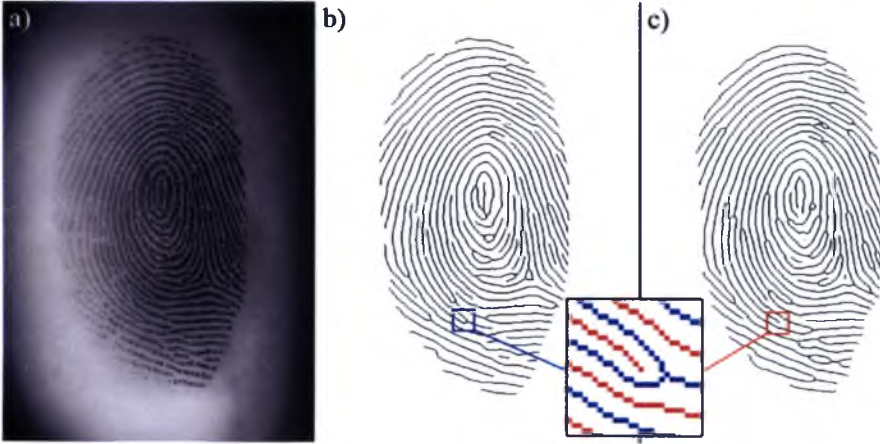
$$\varphi_i = \begin{cases} \bar{\theta}(x_i, y_i) & \text{gdy } |\bar{\theta}(x_i, y_i) - \delta_{m_i}| < |\pi + \bar{\theta}(x_i, y_i) - \delta_{m_i}| \\ \pi + \bar{\theta}(x_i, y_i) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.65)$$

Krok 4

W celu wyznaczenia kąta φ_i minucji typu b utwórz negatyw obrazu I_{qual} :

$$\tilde{I}_{qual}(x, y) = \begin{cases} 1 - I_{qual}(x, y) & \text{gdy } Sg_{bin}(x, y) = 0 \\ I_{qual}(x, y) & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.66)$$

Wyznaczony obraz \tilde{I}_{qual} podaj procesowi szkieletyzacji **Algorytmem 9**. Efektem działania algorytmu na obrazie negatywowym \tilde{I}_{qual} jest obraz \tilde{I}_{skel} (zaprezentowany na Rys. 4.31c).



Rysunek 4.31: a) Źródłowy obraz linii papilarnych, b) wynik szkieletyzacji obrazu I_{qual} , c) obraz szkieletyzacji \tilde{I}_{skel} obrazu negatywowego \tilde{I}_{qual} .

Zgodnie z Krokiem 2, wyznacz położenie zakończeń bruzd (punkty (x, y) o wartości $Cn = 1$) na obrazie szkieletyzacji negatywu. Wyznaczone zakończenia bruzd występują pomiędzy listewkami skórnymi minucji zakończenie, co przedstawiono na Rys. 4.31b i 4.31c.

Dla każdej bruzdy, zgodnie z Krokiem 3, wyznacz kąt φ_i i przypisz go do minucji typu rozwidlenie, pomiędzy której listewkami skórnymi wystąpiła bruzda.

Krok 5

Na krawędziach obrazu mogą pojawić się minucje fałszywe, które należy usunąć. Sposób usuwania takich minucji opisano w Rozdziale 4.6 - Rys. 4.20a.

Ze względu na możliwą niską jakość obrazu linii papilarnych oraz niepoprawną binaryzację, pośród tak wyznaczonych minucji nadal mogą znajdować się minucje fałszywe. Punkty takie należy usunąć w procesie eliminacji minucji fałszywych.

Algorytm 12. Eliminacja minucji fałszywych.**Krok 1**

Dla każdej pary minucji $\mathbf{m}_i = [x_i, y_i, \varphi_i]$ oraz $\mathbf{m}_j = [x_j, y_j, \varphi_j]$ dowolnego typu (typ t lub b) wyznacz między nimi odległość sd (Rys. 4.32):

$$sd(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i, j = 1, \dots, a, i \neq j \quad (4.67)$$

gdzie a jest liczbą wyrytych minucji na obrazie linii papilarnych.

Krok 2

Dla każdej pary minucji $\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j$ dowolnego typu (typ t lub b) wyznacz współczynnik kierunkowy c prostej $l : y = cx + b$ przechodzącej przez obie minucje:

$$l : y = \frac{(y_j - y_i)(x - x_i)}{(x_j - x_i)} + y_i \quad (4.68)$$

Wyznacz kąt α nachylenia prostej $l : y = cx + b$ do osi OX (Rys. 4.32):

$$\alpha = \text{tg}^{-1}(c) \quad (4.69)$$

Krok 3

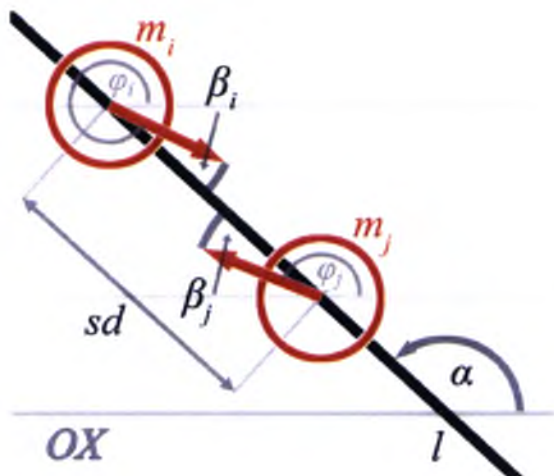
Wyznacz różnicę pomiędzy kątami nachylenia φ_n , $n = i, j$, a kątem α (Rys. 4.32):

$$\beta_n = \min(|\alpha - \varphi_n|, |\alpha - \pi - \varphi_n|), n = i, j \quad (4.70)$$

Krok 4

Ocechuj wszystkie pary typu $(\mathbf{m}_i^t, \mathbf{m}_j^t)$ i $(\mathbf{m}_i^b, \mathbf{m}_j^b)$ dla których spełniony jest warunek:

$$\left(sd(\mathbf{m}_i, \mathbf{m}_j) \leq 1,5\bar{f} \right) \wedge \left(|\beta_i - \beta_j| \leq \frac{\pi}{4} \right), \quad i, j = 1, \dots, z, i \neq j \quad (4.71)$$



Rysunek 4.32: Zasada wyznaczania odległości sd oraz kątów β_i, β_j dla dowolnego typu minucji m_i, m_j .

Krok 5

Ocechuj wszystkie pary typu (m_i^b, m_j^t) i (m_i^b, m_j^b) dla których spełniony jest warunek:

$$\left(sd(m_i^b, m_j^t) \leq 1,5\bar{f} \right) \wedge \left(|\beta_i - \beta_j| > \frac{\pi}{6} \right), \quad i, j = 1, \dots, z, i \neq j \quad (4.72)$$

Krok 6

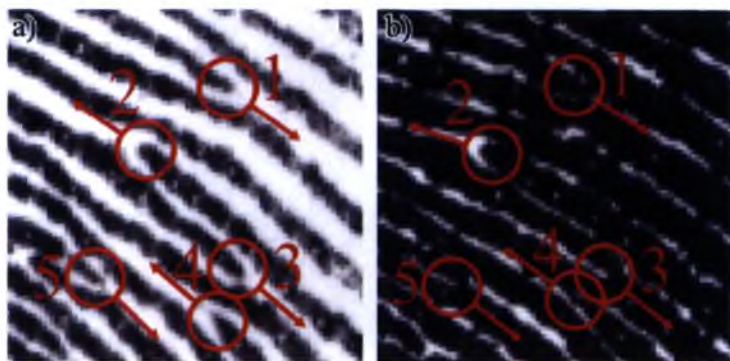
Usuń wszystkie ocechowane minucje ze zbioru wykrytych minucji.

Minucje pozostałe po procesie eliminacji (Rys. 4.33) są zapisywane, jako ostateczny zbiór minucji wyznaczonych w procesie automatycznej detekcji.

Informacja o typie minucji (rozwidlenie / zakończenie) jest pomijana ze względu na możliwą niejednoznaczność typu minucji. Wynika to obserwacji, że w zależności od jakości obrazu, ta sama minucja może być rozpoznana jako minucja typu zakończenie, a na innym jako rozwidlenie (Rys. 4.34).



Rysunek 4.33: Wyznaczone prawidłowo w przebiegu Algorytmu 12 minucje. Kolor czerwony - minucje typu t , kolor niebieski - minucje typu b .



Rysunek 4.34: Niejednoznaczność rozpoznawania minucji o numerach 3 i 5 na obrazach linii papilarnych tego samego palca. a) Obraz dobrej jakości. b) Obraz odcisku mokrego.

Rozdział 5

Wyniki eksperymentów

5.1 Wprowadzenie

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań opracowanej przez autora metody analizy i poprawy jakości obrazów linii papilarnych oraz ich porównanie z wynikami uzyskiwanymi w systemie AFIS wykorzystywanym przez Centralne Laboratorium Kryminalistyczne w Warszawie. Jak już wspomniano, opracowana w rozprawie technika analizy i poprawy jakości linii papilarnych wykorzystuje metody wyznaczania nachylenia i częstości występowania listewek skórnych. Metody te zostały porównane z innymi opisywanymi w literaturze metodami.

Czas pracy eksperta daktyloskopii jest zależny od jakości analizowanego obrazu linii papilarnych. Im niższa jakość obrazu tym liczba niepoprawnie wyznaczonych minucji jest większa. W przypadku systemów w pełni autonomicznych jakość obrazu wpływa na liczbę prawidłowych rozpoznań. W pracy przedstawiono technikę poprawy jakości obrazów linii papilarnych oraz ich analizy.

Scenariusz badań, mający na celu potwierdzenie postawionej w rozprawie tezy, obejmował kilka etapów. We wszystkich etapach badań, do weryfikacji wyników używano baz FVC i NIST oraz bazy zbudowanej na podstawie akwizycji własnej. Szczegółowe charakterystyki wymienionych baz przedstawiono poniżej.

Standardowe metody pomiaru jakości obrazów [73] nie umożliwiają określenia prawidłowej oceny stopnia czytelności linii papilarnych. Przykładowo obrazy odcisków suchych lub mokrych nadal mogą posiadać wysoki kontrast oraz ostrość. Z tego względu skuteczność opracowanych technik została zbadana pośrednio,

następującymi metodami:

- Badanie skuteczności wyznaczania minucji na obrazach linii papilarnych zawartych w testowej bazie danych (Rozdział 5.3). Badanie wykonano z wykorzystaniem wskazań eksperta daktyloskopii oraz porównano z wynikami uzyskanymi systemem AFIS MetaMorpho firmy Sagem stosowanym w polskiej Policji.
- Badanie dokładności wyznaczania częstości występowania i kąta nachylenia listewek skórnych (obrazu kierunków) (Rozdział 5.4). Liczba prawidłowo wyznaczonych minucji jest silnie zależna od dokładności wyznaczania tych cech. Wyniki uzyskane w badaniu porównano z zaimplementowanymi algorytmami opisanymi w [70, 130].

Wszystkie badania wykonane zostały przy współudziale eksperta daktyloskopii w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym Komendy Głównej Policji w Warszawie.

5.2 Charakterystyka badanego zbioru obrazów

Badania przeprowadzono na zbiorze danych rzeczywistych. Wykorzystano zbiory cyfrowych obrazów linii papilarnych zawarte w repozytoriach FVC, NIST, w bazie odcisków przygotowanej przez autora pracy, w tym obrazów ujawnionych technikami śledczymi w Pracowni Wizualizacji Śladów Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP w Warszawie.

Baza FVC

Baza FVC składa się z obrazów udostępnianych na stronach WWW w ramach zawodów Fingerprint Verification Competition [37]. Baza zawiera 1876 cyfrowych obrazów linii papilarnych pochodzących z różnego typu skanerów optycznych i pojemnościowych. Wszystkie obrazy zapisane są w rozdzielczości 500dpi.

W bazie znajduje się 49 referencyjnych obrazów przeznaczonych do celów porównawczych, oznaczonych jako obrazy o niskiej jakości oraz 25 obrazów oznaczonych jako obrazy wysokiej jakości. Jakość pozostałych obrazów nie została określona.

Baza NIST

Baza NIST składa się z obrazów udostępnianych przez agencję federalną rządu Stanów Zjednoczonych - National Institute of Standards and Technology [56]. Baza zawiera 130 obrazów linii papilarnych palców odciskanych na powierzchni karty białego papieru, a następnie skanowanych w rozdzielczości 500dpi. Informacja o jakości obrazów nie została określona.

Akwizycja własna

W bazie zgromadzono 1774 cyfrowe obrazy linii papilarnych utrwalonych przez autora rozprawy. Obrazy te można podzielić na dwie grupy:

- 800 obrazów uzyskano w trybie indywidualnej akwizycji, od 10 osób, za pomocą skanera optycznego. Każda z osób złożyła 8 odcisków jednego palca, co daje łącznie 80 obrazów dla jednej osoby. Każdy obraz o wymiarach 620×620 pikseli zapisano w rozdzielczości 500dpi. Baza została przygotowana z wykorzystaniem skanera optycznego Verifier 300 LC firmy Crossmatch [27]. Baza jest udostępniona bez żadnych ograniczeń do celów naukowych na stronie [www \[90\]](http://www.fbi.gov).
- 974 obrazów linii papilarnych odciskanych na powierzchniach chłonnych (karta papieru, dokumenty zawierające zabezpieczenia luminescencyjne) oraz powierzchniach niechłonnych (butelki szklane i plastikowe, blat stołu, folia). Odciski zostały ujawnione w Pracowni Wizualizacji Śladów Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP w Warszawie roztworami chemicznymi: ARDROX, DFO, safranina, Basic Yellow, DMAC, ninhydryna, a następnie utrwalone fotograficznie w świetle widzialnym lub UV.

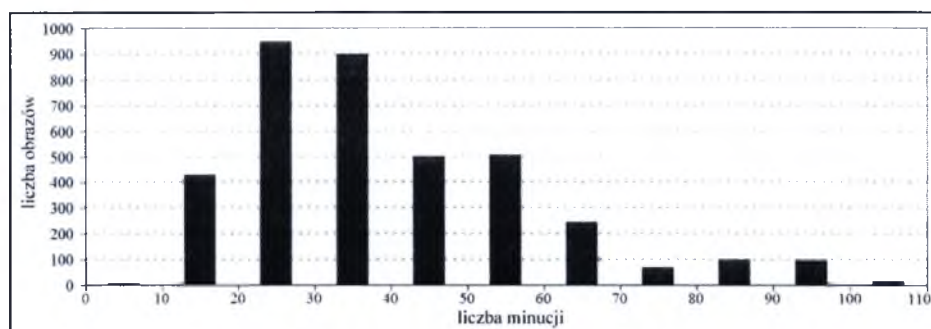
Baza testowa zawiera więc łącznie 3780 obrazów. Obrazy zawarte w bazie danych zostały poddane ocenie eksperta daktyloskopii Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP w Warszawie. Na podstawie oceny eksperta w bazie można wyróżnić:

- 1560 odcisków ocenionych jako odciski suche,
- 1074 odcisków ocenionych jako odciski mokre,
- 1146 odcisków ocenionych jako odciski dobrej jakości.

Na każdym obrazie, zawartym w bazie danych ekspert daktyloskopii ręcznie wyznaczył macierz minucji. Zapis cech oraz macierz minucji zostały opisane już w Rozdziale 2 (wzory 2.6 i 2.9).

Ekspert wyznaczył również nachylenie oraz częstość listewek skórnych na 1060 obrazach linii papilarnych bazy danych. Liczba analizowanych w ten sposób obrazów była ograniczona ze względu na czasochłonność operacji i ograniczenia czasowe ekspertów daktyloskopii.

Na podstawie analizy wskazań przeprowadzonych przez eksperta daktyloskopii oszacowany został rozkład minucji na obrazach testowej bazy danych. Rozkład ten zaprezentowano na Rys. 5.1.



Rysunek 5.1: Rozkład liczby minucji wyznaczonych przez eksperta daktyloskopii w obrazach testowej bazy danych (liczba obrazów 3870).

Ekspert daktyloskopii określił również podstawowe klasy wzorów [77] odcisków występujących w bazie danych. Cechy te nie są wykorzystywane w niniejszej rozprawie, jednakże zostały sprecyzowane ze względu na udostępnienie bazy danych na stronie internetowej zakładu, gdzie pracuje autor rozprawy [90].

5.3 Wyniki badań

W automatycznych systemach biometrycznych często stosowane są specjalne współczynniki oceny skuteczności tych systemów - tzw. współczynniki FAR i FRR. Jednakże, systemy policyjne nie są w pełni automatyczne, gdyż w procesie analizy odcisku linii papilarnych bierze zawsze udział specjalista daktyloskopii, który wstępnie ocenia i normuje obraz oraz weryfikuje wyznaczone automatycznie cechy. Należy również wziąć pod uwagę, że nie można wprowadzać żadnych danych testowych do bazy systemu policyjnego systemu AFIS. W sposób restryk-

cyjny ogranicza to metodykę prowadzenia badań porównawczych.

Opracowane w rozprawie algorytmy analizy obrazów linii papilarnych oceniane były za pomocą innych, znanych z literatury wskaźników:

- liczba *FM* minucji fałszywie wskazanych przez algorytm (minucje fałszywe - ang. *false minutiae*) - określa liczbę minucji, które ekspert daktyloskopii musi usunąć w procesie weryfikacji wyniku działania algorytmu,
- liczba *DM* minucji pominiętych przez algorytm (ang. *dropped minutiae*) - określa liczbę minucji, które ekspert daktyloskopii musi dodatkowo ręcznie wyznaczyć w procesie weryfikacji wyniku działania algorytmu,
- liczba *EM* minucji o błędnie wyznaczonym kierunku lub pozycji (ang. *erroneous minutiae*) - określa liczbę minucji, których położenie bądź nachylenie, wyznaczone algorytmicznie, musi w procesie weryfikacji zostać poprawione przez eksperta daktyloskopii. Zachodzi przy tym zależność, że każde jedno wystąpienie błędu *EM* jest jednym wystąpieniem błędu *FM* oraz *DM*: $(EM + 1 \Rightarrow FM + 1 \wedge DM + 1)$,
- liczba *TM* minucji poprawnych (ang. *true minutiae*) - liczba wszystkich minucji wyznaczonych przez eksperta daktyloskopii, pozwalająca na prawidłowe określenie powyższych wskaźników.

Przyjęto, zgodnie z wytycznymi Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego, że wynikami referencyjnymi są wskazania eksperta daktyloskopii. Na potrzeby badań ekspert ręcznie wyznaczył położenie oraz kąt nachylenia wszystkich minucji na obrazach testowej bazy. Należy zaznaczyć, że w praktyce czynności te wykonywane są automatycznie przez system MetaMorpho, a ekspert tylko koryguje błędne wskazania systemu, co opisano powyżej.

Powyżej opisane wskaźniki błędów muszą być wyznaczone automatycznie, gdyż wzrokowa ocena wykonywana przez eksperta może być obciążona subiektywnym błędem. Z tego względu ocena eksperta nie byłaby wiarygodna.

Również wskazania położenia minucji wykonane przez eksperta mogą być obciążone trudnym do zmierzenia, bardzo małym błędem. Z tego względu, w badaniu skuteczności porównywanych metod, należało przyjąć próg tolerancji błędów wskazań eksperta oraz badanych algorytmów. Progi takie są stosowane we wszystkich systemach AFIS gdyż elastyczność naskórka powoduje, że porównywane minucje mogą być względem siebie przesunięte.

W Rozdziale 2.5 przedstawiono metodę wyznaczania podobieństwa obrazów linii papilarnych, na podstawie liczby minucji wspólnych. Podobieństwo minucji występujących na dwóch obrazach wyznaczone jest na podstawie zależności 2.13 - 2.15. Uznaje się, że minucje są podobne, jeśli ich położenie oraz nachylenie mieści się poniżej zadanego progu tolerancji.

W opisach literaturowych [47, 23, 58] spotyka się wartości progów tolerancji położenia minucji w zakresie: od 6 do 17 pikseli oraz progi tolerancji ich nachylenia w zakresie od 25° do 60° (dla obrazów 500dpi).

Dla opracowanych w rozprawie algorytmów zbadano, czy wymienione powyżej progi tolerancji spełniają warunki opisane w literaturze [58]. Wartości progów tolerancji oszacowano na podstawie analizy wartości wskaźników *DM* oraz *FM*.

W tym celu porównywane są zbiory minucji $\mathbf{m}_i = [x_i, y_i, \varphi_i]$, $i = 1, \dots, a$, wyznaczonych przez eksperta oraz $\mathbf{m}_j = [x_j, y_j, \varphi_j]$, $j = 1, \dots, b$, wyznaczonych automatycznie. Należy ustalić wartość progu tolerancji położenia r_0 oraz nachylenia φ_0 porównywanych minucji:

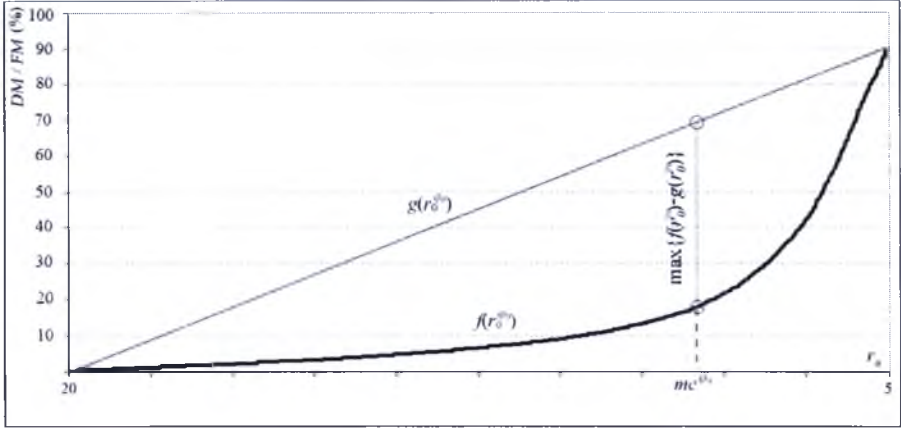
$$\begin{aligned} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} &\leq r_0, \\ \min(|\varphi_i - \varphi_j|, 2\pi - |\varphi_i - \varphi_j|) &\leq \varphi_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Jeśli zależności (5.1) są spełnione wówczas uznaje się, że porównywane minucje są podobne.

Wyznaczenie wartości błędów *FM* oraz *DM* wymaga porównania każdej minucji \mathbf{m}_i , wyznaczonej przez eksperta, ze zbiorem minucji $\mathbf{m}_j = [x_j, y_j, \varphi_j]$, $j = 1, \dots, b$. Jeżeli porównywana para minucji \mathbf{m}_i oraz \mathbf{m}_j spełnia zależności (5.1), to są one usuwane ze zbiorów i rozpoczyna się porównywanie kolejnej pary minucji. Po wykonaniu wszystkich możliwych porównań, w zbiorze minucji wyznaczonych przez eksperta pozostaje *DM* minucji, a w zbiorze minucji wyznaczonych automatycznie pozostaje *FM* minucji.

W celu określenia wartości progów tolerancji wyznaczono rozkład błędu *DM* i *FM* (Rys. 5.2) dla $5 \leq r_0 \leq 20$ pikseli oraz $20^\circ \leq \varphi \leq 70^\circ$. Wyznaczone wartości błędów można aproksymować odpowiednimi funkcjami $f_{FM}(f_{DM})$ oraz $g_{FM}(g_{DM})$.

Dla ustalenia uwagi niech będą to funkcje f oraz g .

Rysunek 5.2: Zasada wyznaczania punktu mc .

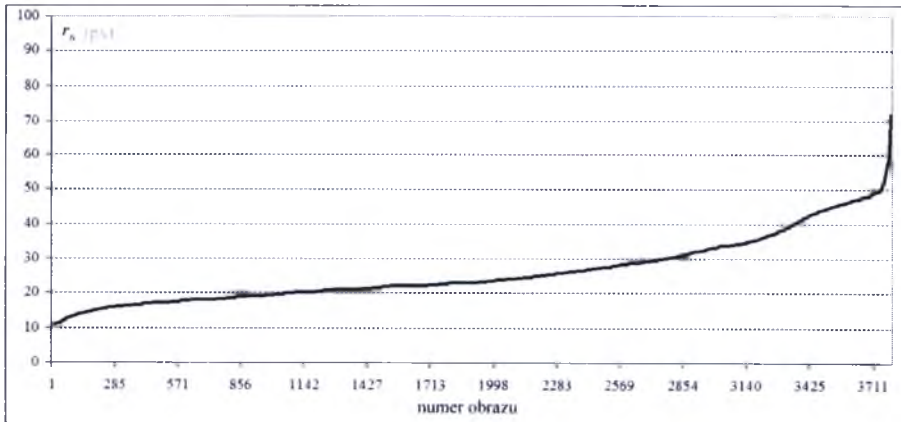
Wartość progu jest szacowana na podstawie położenia punktu mc , powyżej którego następuje gwałtowny wzrost błędów DM lub FM [58]:

$$mc^{\varphi_0} = \max_{r_0^{\varphi_0}} \{f(r_0^{\varphi_0}) - g(r_0^{\varphi_0})\}, \quad \varphi_0 = (20^\circ, 25^\circ, \dots, 70^\circ) \quad (5.2)$$

Optymalne wartości progów tolerancji r_0 i φ_0 wyznaczone są dla minimalnej wartości mc :

$$r_0 = \min\{mc^{\varphi_0} : \varphi_0 = (20^\circ, 25^\circ, \dots, 70^\circ)\} \quad (5.3)$$

Dla wszystkich obrazów testowej bazy danych (3780 obrazów) wyznaczono przebieg (Rys. 5.3) zmian wartości r_0 . Wyznaczone wartości zostały posortowane narastająco.

Rysunek 5.3: Przebieg zmian wartości wyznaczonego progu tolerancji r_0 .

Zgodnie z [58] prawidłowe porównanie położenia oraz kąta nachylenia minucji uzyskuje się dla minimalnych wartości progów tolerancji. Minimalna wartość $r_0 = 11$ została wyznaczona dla $\varphi_0 = 30^\circ$.

Wyznaczenie błędu EM wymaga ustalenia dodatkowych wartości dla parametrów r_0 oraz φ_0 . Zgodnie ze stanowiskiem eksperta, różnica położenia minucji mieszcząca się w progu $11 < r_0 \leq 16$ lub $30^\circ < \varphi_0 \leq 180^\circ$ odpowiada minucji o błędnie wyznaczonym kierunku lub pozycji.

Metoda poprawy jakości i wyznaczania minucji przedstawiona w tym rozdziale rozprawy opisana będzie akronimem QEMD (ang. *Quality Enhanced Minutiae Detection*). Algorytm wyznaczania minucji systemu AFIS MetaMorpho będzie oznaczany skrótem AMM. W badaniach użyto 3780 obrazów linii papilarnych, zgromadzonych w opisaney powyżej testowej bazie danych. Otrzymane wyniki porównawcze przedstawiono w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1: Błędy algorytmów wykrywania minucji systemem MetaMorpho (AMM) oraz metodą QEMD*.

Błąd	Średni błąd		Liczba przypadków		
	QEMD	AMM	QEMD<AMM	QEMD>AMM	QEMD=AMM
<i>FM</i>	9,36	18,92	3121	518	141
<i>DM</i>	6,23	5,83	1509	1872	399
<i>EM</i>	1,57	1,47	1303	1316	1161

* Błędy podano jako liczbę odpowiednich minucji.

Wymienione powyżej wskaźniki nie są wystarczającą miarą określenia skuteczności opracowanych algorytmów. Wskaźniki te powiązane są jednak ze sobą zależnościami, które jednoznacznie pozwalają na pełną ocenę skuteczności algorytmów wyznaczania minucji. Zależności te opisane są następującymi współczynnikami:

- współczynnik fałszywie wykrytych minucji FMR (ang. *false minutiae ratio*):

$$FMR = \frac{FM \cdot 100}{TM + FM + EM - DM}, \quad (5.4)$$

- współczynnik minucji pominiętych DMR (ang. *dropped minutiae ratio*):

$$DMR = \frac{DM \cdot 100}{TM}, \quad (5.5)$$

- współczynnik poprawnie wykrytych minucji o błędnie wyznaczonym kierunku lub pozycji *EMR* (ang. *erroneous minutiae ratio*) :

$$EMR = \frac{FM \cdot 100}{TM + FM + EM - DM} \quad (5.6)$$

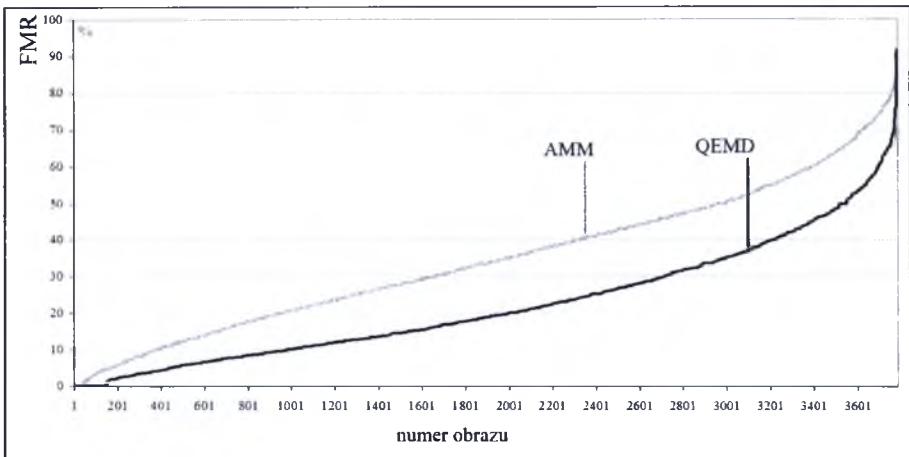
Dla tak określonych założeń, wyznaczone średnie wartości błędów *FMR*, *DMR* i *EMR* przedstawione zostały w Tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Średnie wartości błędów wyznaczania minucji metodą QEMD oraz AMM .

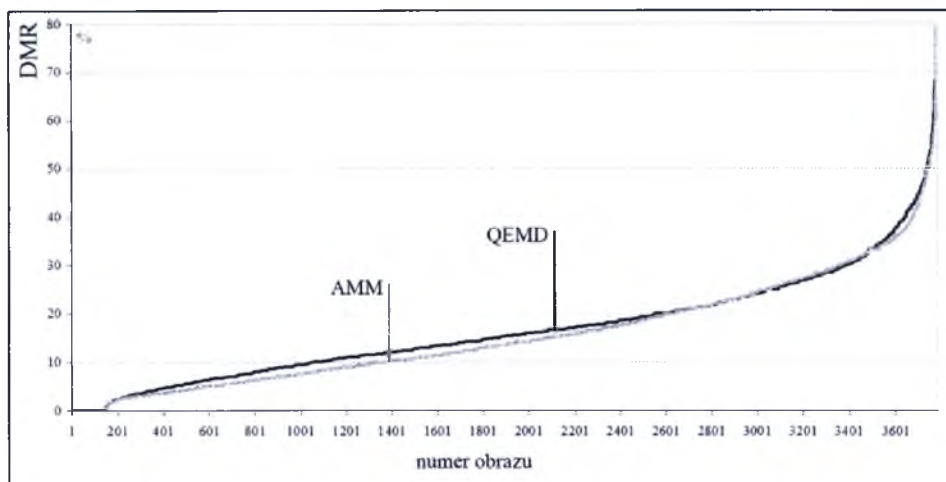
Błąd	QEMD	AMM
<i>FMR</i>	22,02%	34,51%
<i>DMR</i>	16,69%	15,77%
<i>EMR</i>	3,48%	2,78%

Uzyskane wyniki wskazują, że w proponowany algorytm QEMD znacząco redukuje wykrywanie minucji fałszywych w stosunku do algorytmu AMM (ponad 12%). Pozostałe błędy są nieznacznie większe (mniej niż 1%) w stosunku do algorytmu AMM.

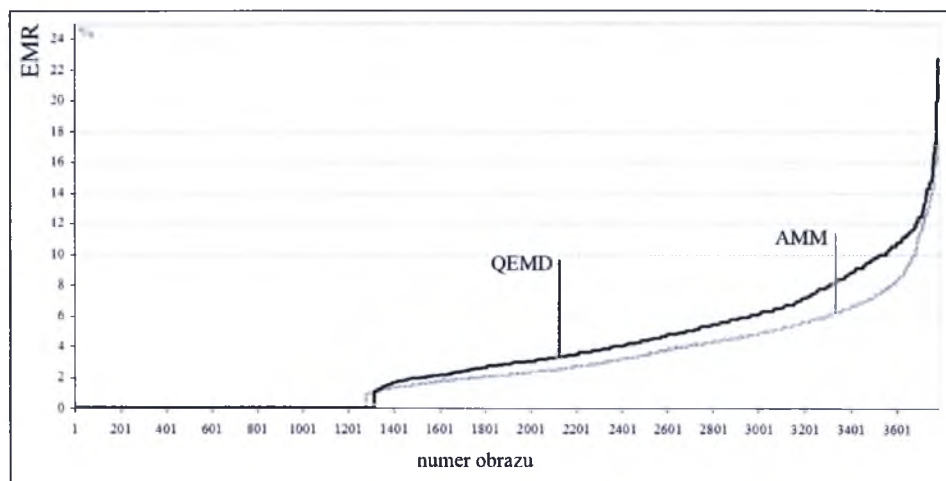
Krzywe błędów wyznaczone dla wszystkich 3780 obrazów, zostały przedstawione na Rys. 5.4-5.6. Wyznaczone wartości zostały posortowane narastająco, w celu określenia charakterystyki badanych algorytmów.



Rysunek 5.4: Krzywe błędu *FMR* - współczynnik wyznaczeń minucji fałszywych.



Rysunek 5.5: Krzywe błędu *DMR* - współczynnik minucji pominiętych.



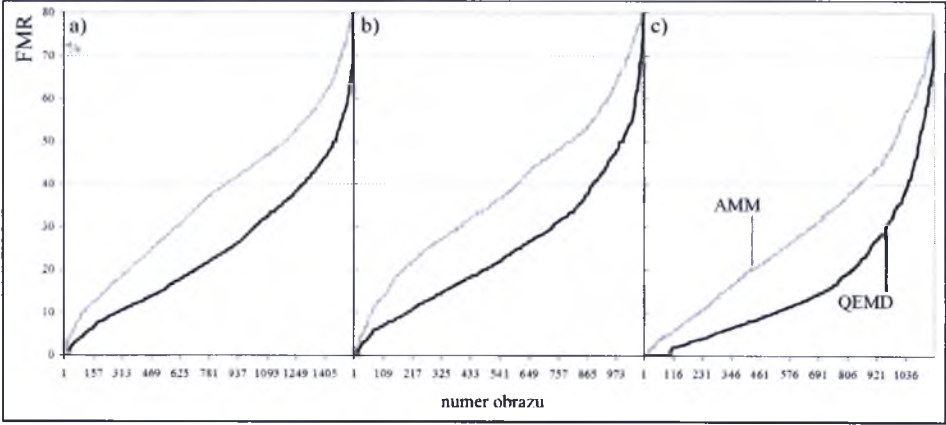
Rysunek 5.6: Krzywe błędu *EMR* - współczynnik poprawnie wykrytych minucji o błędnie wyznaczonym kierunku lub pozycji.

W Tabeli 5.3 zaprezentowano wyniki badań z podziałem na obrazy niskiej jakości tj. obrazy odcisków suchych i mokrych oraz obrazy dobrej jakości. Podziału dokonał ekspert daktyloskopii.

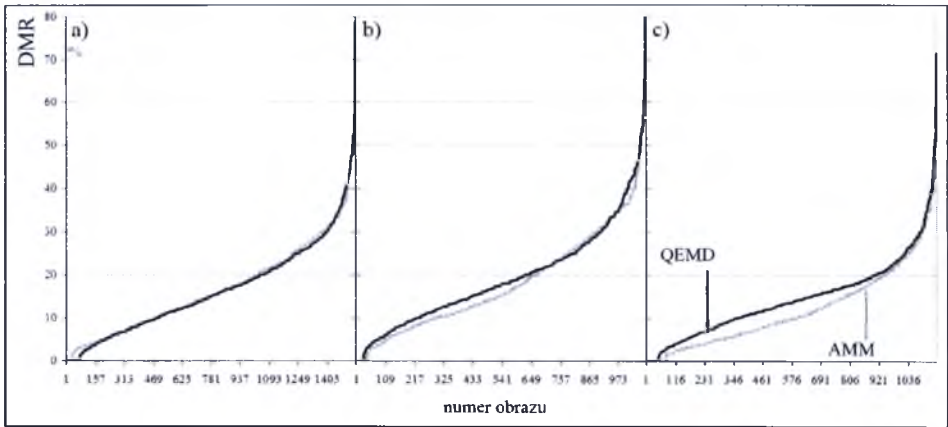
Tabela 5.3: Średnie wartości błędów wyznaczania minucji metodą QEMD oraz AMM dla obrazów dobrej jakości oraz obrazów odcisków suchych i mokrych.

Błąd	Obrazy odcisków					
	QEMD			AMM		
	suchych	mokrych	dobrej jakości	suchych	mokrych	dobrej jakości
<i>FMR</i>	24,48%	24,72%	16,14%	36,62%	37,92%	28,43%
<i>DMR</i>	16,38%	19,37%	14,59%	16,84%	18,17%	12,07%
<i>EMR</i>	4,45%	3,42%	12,21%	3,17%	3,05%	2,01%

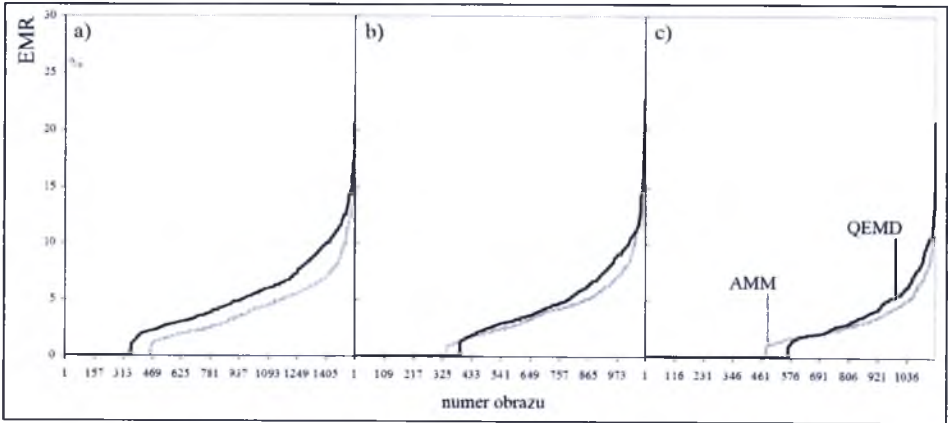
Błędy wymienione powyżej można również przedstawić za pomocą wykresów - Rys. 5.7-5.9, co pozwala na ich bardziej szczegółową analizę.



Rysunek 5.7: Krzywe błędu *FMR* wyznaczone dla obrazów oznaczonych przez eksperta daktyloskopii jako obrazy: a) odcisków suchych, b) odcisków mokrych, c) dobrej jakości.



Rysunek 5.8: Krzywe błędu *DMR* wyznaczone dla obrazów oznaczonych przez eksperta daktyloskopii jako obrazy: a) odcisków suchych, b) odcisków mokrych, c) dobrej jakości.

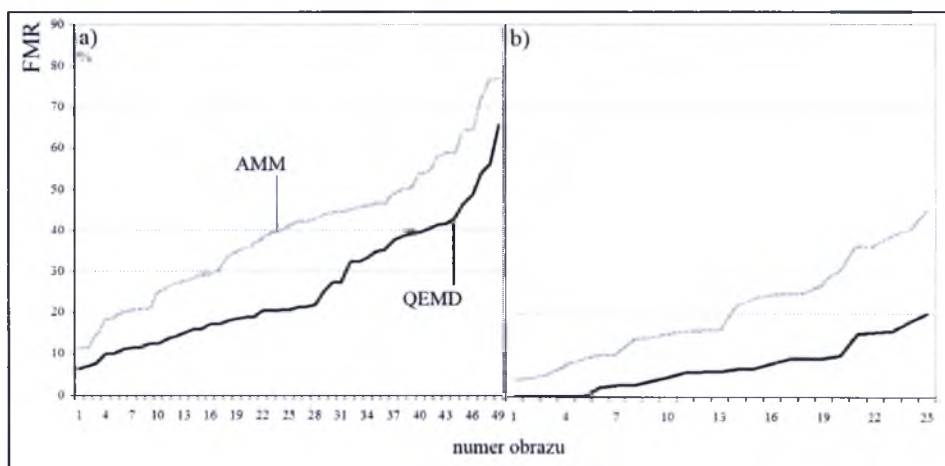


Rysunek 5.9: Krzywe błędu *EMR* wyznaczone dla obrazów oznaczonych przez eksperta daktyloskopii jako obrazy: a) odcisków suchych, b) odcisków mokrych, c) dobrej jakości.

W celach referencyjnych wyznaczono także krzywe błędów (Rys. 5.10-5.12) oraz średnie wartości błędów dla obrazów bazy FVC z podziałem na obrazy o niskiej oraz wysokiej jakości (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Średnie wartości błędów wyznaczania minucji metodą QEMD oraz AMM dla obrazów bazy FVC dobrej oraz niskiej jakości.

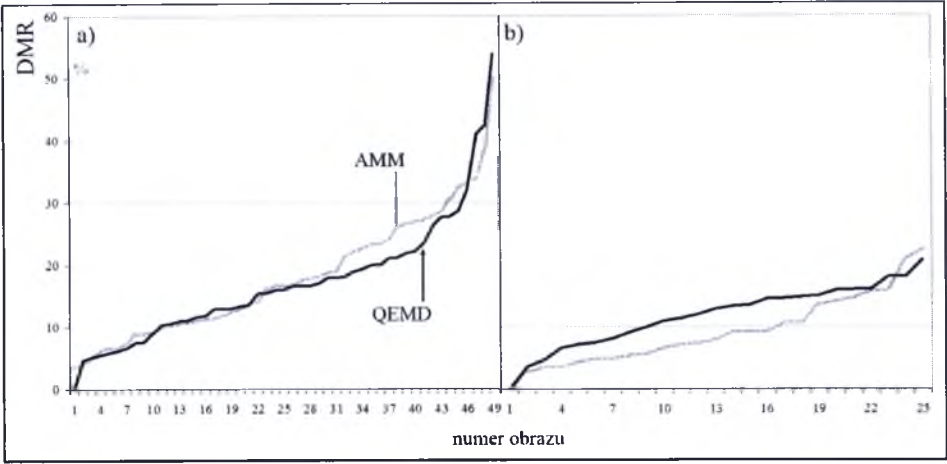
Błąd	Obrazy odcisków			
	QEMD		AMM	
	niskiej jakości	dobrej jakości	niskiej jakości	dobrej jakości
<i>FMR</i>	25,94%	7,11%	40,02%	20,76%
<i>DMR</i>	17,18%	11,81%	18,03%	9,26%
<i>EMR</i>	3,56%	0,93%	3,25%	1,07%



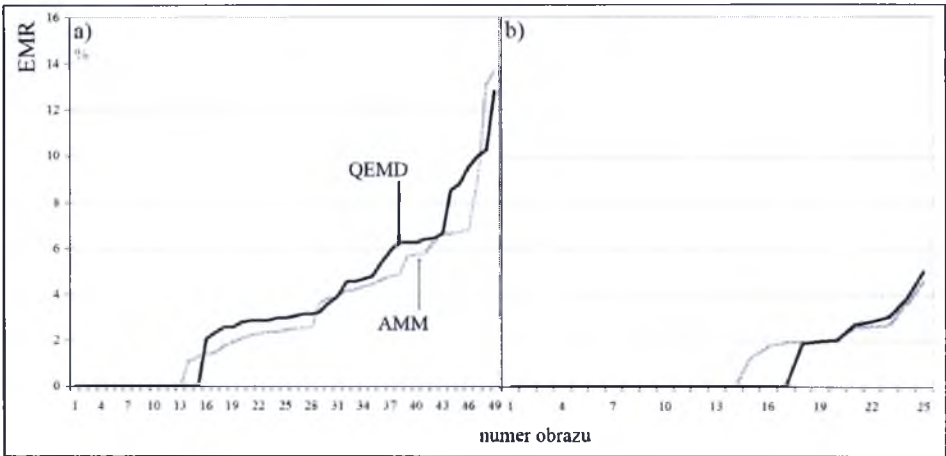
Rysunek 5.10: Krzywe błędów *FMR* wyznaczone dla obrazów bazy FVC oznaczonych jako: a) odcisków niskiej jakości, b) odcisków dobrej jakości.

Przedstawione w Tabelach 5.1-5.2 wyniki wskazują, że metoda QEMD, w porównaniu do systemu AFIS MetaMorpho powoduje zmniejszenie o połowę wystąpienia minucji fałszywych.

Badania z wykorzystaniem obrazów bazy FVC oznaczonych jako obrazy złej oraz wysokiej jakości, jeszcze bardziej uwypuklają przewagę metody QEMD nad algorytmem AMM.



Rysunek 5.11: Krzywe błędu *DMR* wyznaczone dla obrazów bazy FVC oznaczonych jako: a) odcisków niskiej jakości, b) odcisków dobrej jakości.



Rysunek 5.12: Krzywe błędu *EMR* wyznaczone dla obrazów bazy FVC oznaczonych jako: a) odcisków niskiej jakości, b) odcisków dobrej jakości.

5.4 Wyznaczanie częstości występowania oraz kierunku linii papilarnych

W pierwszym etapie badań, wykonanych w Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP w Warszawie, ekspert daktyloskopii wyznaczył nachylenie oraz częstość występowania listewek skórnych na 1060 obrazach linii papilarnych bazy danych. Liczba analizowanych obrazów była ograniczona, ze względu na czasochłonność operacji i ograniczenia czasowe ekspertów daktyloskopii. Pomiary dokonywane były przy pomocy przygotowanej do tego celu aplikacji.

Wykonane badania pozwoliły na:

- dobór parametrów algorytmów opisanej w rozprawie metody QEMD,
- zbadanie dokładności wyznaczania częstości występowania i kąta nachylenia listewek skórnych metodami przedstawionymi w rozprawie.

5.4.1 Dobór parametrów algorytmów metody QEMD

W Rozdziale 4 rozprawy opisano metodę analizy obrazów linii papilarnych wraz z poprawą jakości (metoda QEMD). Metoda ta składa się z szeregu powiązanych ze sobą algorytmów. Prawidłowe działanie algorytmów uzależnione jest od odpowiedniego doboru ich parametrów. Parametry można dobierać na podstawie wskazań literaturowych [70, 61, 58], które są jednak różne i niejednoznaczne. Z tego względu parametry zostały dobrane na podstawie badań wykonanych z udziałem eksperta daktyloskopii.

W celu określenia wartości parametrów ekspert daktyloskopii Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego KGP w Warszawie dokonał ręcznych pomiarów cech linii papilarnych. Mierzone cechy były ręcznie wyznaczane w specjalnej aplikacji przez eksperta daktyloskopii. Pomiary wykonywane były w nienachodzących na siebie oknach o wymiarach 64×64 pikseli (Rys. 5.13a), w których występowały minimum cztery listewki skórne. Rozmiar okien wynikał z potrzeby dokonania porównań autorskiej metody wyznaczania częstości listewek skórnych, opisanej w Rozdziale 4.5, z metodą [130], gdzie taki podział został przyjęty.

Na podstawie wskazanych przez eksperta prawidłowych cech obrazu linii papilarnych (częstość występowania listewek skórnych oraz kąt nachylenia), dobrano następujące parametry:

- **Parametr 1.** Rozmiar okna W (Rozdział 4.1:Algorytm 1, Rozdział 4.4:Algorytmy 4 i 5, Rozdział 4.5:Algorytm 6, Rozdział 4.6:Algorytm 7).

- **Parametr 2.** Rozmiar okna Q (Rozdział 4.5:Algorytm 6).
- **Parametr 3.** Rozmiar okna B (Rozdział 4.3).
- **Parametr 4.** Maska operatora detekcji krawędzi (Rozdział 4.4:Algorytm 4).

Parametr 1, Parametr 2 oraz Parametr 3 wyznaczone zostały następująco:

Zgodnie z założeniami przyjętymi w metodzie QEMD okno W wykorzystywane jest do uśredniania wyznaczanych w poszczególnych algorytmach wartości. W każdym oknie W powinny znajdować się średnio dwie listewki skórne, a w obszarze okna B powinna znajdować się średnio jedna listewka skórna. Oznacza to potrzebę wyznaczenia średniej częstości występowania listewek skórnych w obrębie obrazu linii papilarnych zapisanego w rozdzielczości 500dpi. Średnia częstość \bar{f}^E (5.7) została określona na podstawie ręcznych wskazań eksperta daktyloskopii, dla grupy O_i , $i = 1, 2, \dots, 1060$ obrazów. W zależności od wskazań eksperta, obrazy O_i mogły zawierać różną liczbę nv_i okien n (Rys. 5.13), o wymiarach 64×64 pikseli. Dla wszystkich 1060 obrazów wyznaczono średnią częstotliwość \bar{f}^E :

$$\bar{f}^E = \frac{1}{\sum_{i=1}^{1060} nv_i} \sum_{i=1}^{1060} \sum_{j=1}^{nv_i} f_{ij}^E, \quad (5.7)$$

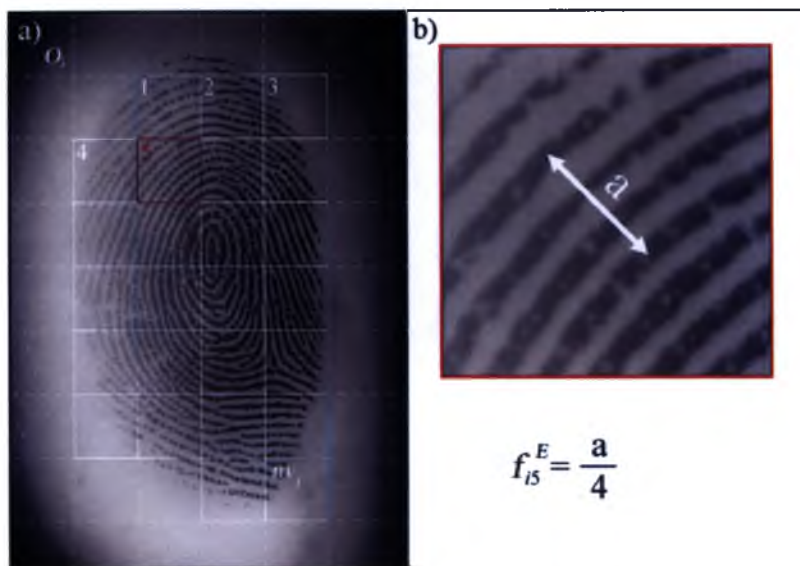
gdzie:

nv_i - jest liczbą okien i -tego obrazu O_i , w których ekspert wykonał pomiar*.

Wyznaczona w ten sposób średnia częstości występowania listewek skórnych \bar{f}^E wynosi 7,671 piksela. Ponieważ okno W z założenia powinno zawierać dwie listewki skórne, wobec tego $\lceil 7,671 \cdot 2 \rceil = 16$ pikseli. Ze względu na fakt, że okno W musi posiadać centralny piksel, rozmiar okna musi być liczbą nieparzystą i wynosi $\omega \times \omega = 17 \times 17$.

Odpowiednio dla okna B wartości te wynoszą $\lceil 7,671 \rceil = 8$. Również okno B musi posiadać centralny piksel, więc przyjęty rozmiar okna wynosi 9×9 .

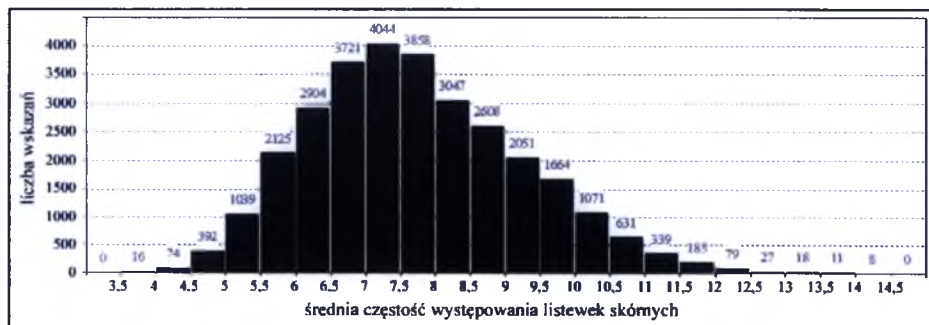
*Łączna liczba okien n , w których dokonano pomiaru wynosiła 29913.



Rysunek 5.13: a) Okna w których ekspert wykonał pomiary, b) zasada pomiaru odległości pomiędzy czterema kolejnymi listewkami skórnymi, umożliwiającą wyliczenie wartości \bar{f}^E średniej częstości.

Parametr 2 wyznaczony został następująco:

Zgodnie z założeniami przyjętymi dla Algorytmu 6 w obszarze okna Q muszą znajdować się nie mniej niż trzy listewki skórne. Na podstawie wskazań eksperta został wyznaczony rozkład częstości występowania listewek skórných (Rys. 5.14).



Rysunek 5.14: Rozkład częstości występowania listewek skórných na obrazach zapisanych w rozdzielczości 500dpi*.

*Zbadano na podstawie wskazań eksperta daktyloskopii CLK w Warszawie.

Z obserwacji wykresu (Rys. 5.14) wynika, że 99,9% wskazań eksperta lokuje częstość występowania listewek skórnych w przedziale od 3,5 do 13,5 pikseli, przy rozdzielczości obrazu 500dpi. Ponieważ w oknie Q ma występować nie mniej niż 3 listewki skórne, przyjęto oszacowanie $k = \lceil 3(13,5) \rceil = 41$. Tym samym okno Q ma rozmiar $k \times k = 41 \times 41$.

Parametr 4.

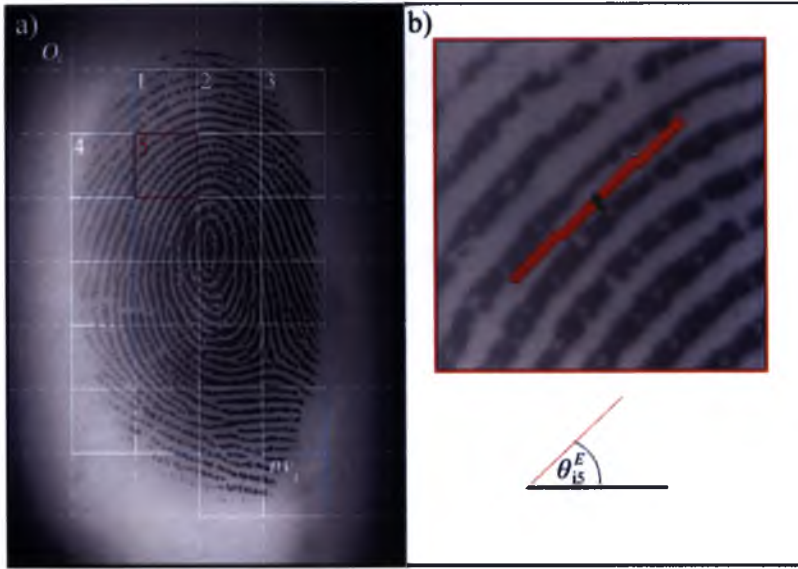
W Rozdziale 4.4 opisano zmodyfikowaną, gradientową metodę wyznaczania obrazu kierunków listewek skórnych. Wartości kąta nachylenia listewki w danym punkcie jest bardzo ważnym parametrem bezpośrednio oddziałującym na liczbę poprawnie wykrytych, w trybie automatycznym, minucji. W Algorytmie 4 wartości gradientów mogą być wyznaczone na podstawie różnych masek detekcji krawędzi. Algorytm ten jest integralną częścią autorskiej metody wyznaczania obrazu kierunków. Dobór odpowiedniej maski w Algorytmie 4 wymagał zbadania dokładności wyznaczania nachylenia listewek skórnych poszczególnymi metodami. Pełen opis badań porównawczych wszystkich metod wyznaczania obrazu kierunków opisano w Rozdziale 5.4.2. Z tego względu opis doboru Parametru 4 zamieszczono również w następnym rozdziale.

5.4.2 Badania kąta nachylenia listewek skórnych

Wyznaczone przez eksperta wartości nachylenia listewek skórnych porównane zostały z wartościami wyznaczonymi metodami automatycznymi: metodą gradientową [70], metodą maski wzorców [66] oraz metodą autorską będącą fuzją powyższych metod. Zmodyfikowana metoda gradientowa została opisana w Algorytmie 4. Wartości gradientów, w tej metodzie, mogą być wyznaczone na podstawie różnych masek detekcji krawędzi. Zbadano więc wpływ użycia różnych masek na dokładność wyznaczania kąta nachylenia listewek skórnych. W badaniach zastosowano następujące, znane maski detekcji krawędzi: gradientu [98], Sobela [68, 39], Prewitta [98], Scharra [64] oraz dodatkowo metodę Canny [21].

Wyznaczone wartości nachylenia listewek skórnych porównane zostały z wartościami kątów nachylenia listewek skórnych wyznaczonymi przez eksperta daktyloskopii na 1060 obrazach linii papilarnych.

Średni błąd $\bar{\theta}^e$ wyznaczania kąta nachylenia listewek skórnych w stosunku do



Rysunek 5.15: Okna w których ekspert wykonał pomiary, b) powiększony obszar jednego z okien gdzie ustalony został przez eksperta kąt θ_{ij}^E nachylenia listewki skórnej.

wskazań eksperta daktyloskopii wyznaczony był na podstawie zależności:

$$\bar{\theta}^E = \frac{1}{\sum_{i=1}^{1060} nv_i} \sum_{i=1}^{1060} \sum_{j=1}^{nv_i} \theta_{ij}^E, \quad (5.8)$$

gdzie:

$$\theta_{ij}^E = \begin{cases} |\theta_{ij}^E - \theta_{ij}^A| & \text{gdy } \theta_{ij}^E - \theta_{ij}^A > \frac{\pi}{2} \\ |\pi - \theta_{ij}^E - \theta_{ij}^A| & \text{w przeciwnym przypadku,} \end{cases} \quad (5.9)$$

θ_{ij}^E - kąt nachylenia listewki skórnej wyznaczony przez eksperta daktyloskopii w j -tym oknie i -tego obrazu O_i .

θ_{ij}^A - kąt nachylenia listewki skórnej wyznaczony automatycznie w j -tym oknie i -tego obrazu O_i .

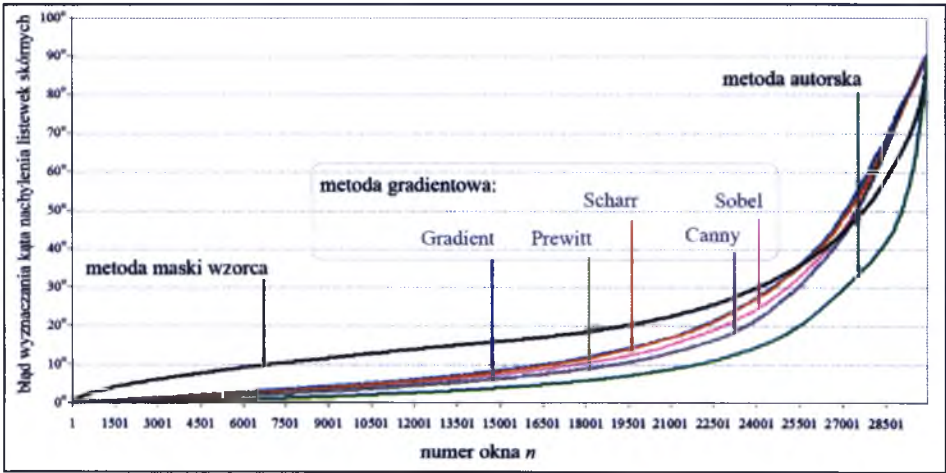
Wymienione powyżej maski detekcji krawędzi zostały porównane ze wskazaniami eksperta za pomocą formuł (5.8-5.9). Wyniki porównań przedstawiono w Tabeli 5.5 oraz na Rys. 5.16. W metodzie Canny zbadano wszystkie wymienione maski detekcji krawędzi. Jednakże, ze względu na ograniczoną czytelność wykresu (Rys. 5.16), przedstawiono tylko wynik metody Canny wykorzystaniem maski Sobela, dla której uzyskano najmniejszy błąd wyznaczania nachylenia listewki skórnej w stosunku do wskazań eksperta.

Tabela 5.5: Średni błąd $\bar{\theta}^e$ wyznaczania kąta nachylenia listewki dla różnych masek i metod, w stosunku do pomiarów wykonanych przez eksperta daktyloskopii*.

Błąd	Metoda gradientowa					Metoda maski wzorców	Metoda autorska
	Gradient	Prewitt	Scharr	Sobel	Canny		
$\bar{\theta}^e$	16,56°	16,38°	16,21°	15,30°	14,49°	20,47°	9,68°

* Wskazania policyjnego eksperta daktyloskopii przyjęto za wzorcowe.

Jak już podano, badania przeprowadzono dla $O_i, i = 1, 2, \dots, 1060$ obrazów. Każdy obraz dzielony był na okna (Rys. 5.15a), a liczba okien n w obrazie O_i wynosiła nv_i . Łącznie analizowano 29913 okien n . W każdym oknie n wyznaczono automatycznie kąty nachylenia listewek skórnych oraz wyznaczono różnicę w stosunku do referencyjnych wskazań eksperta. Wyniki pomiarów przedstawia Rys. 5.16.



Rysunek 5.16: Krzywe błędu kąta nachylenia listewek skórnych względem referencyjnych wskazań eksperta daktyloskopii.

Wyniki badań wskazują, że w Algorytmie 4 do detekcji krawędzi listewek skórnych należy stosować maskę Sobela. Dodatkowo wykazano, że wykorzystanie metody Canny zwiększa dokładność wyznaczania kąta nachylenia. W algorytmie Canny stosowane są maska Sobela oraz filtracja gaussowska. W metodzie autorskiej zastosowano modyfikację metody Canny, gdzie zamiast filtru Gaussa

Tabela 5.6: Średni błąd $\bar{\theta}^e$ wyznaczania kąta nachylenia listewek skórnych względem wskazań eksperta, dla obrazów bazy FVC.

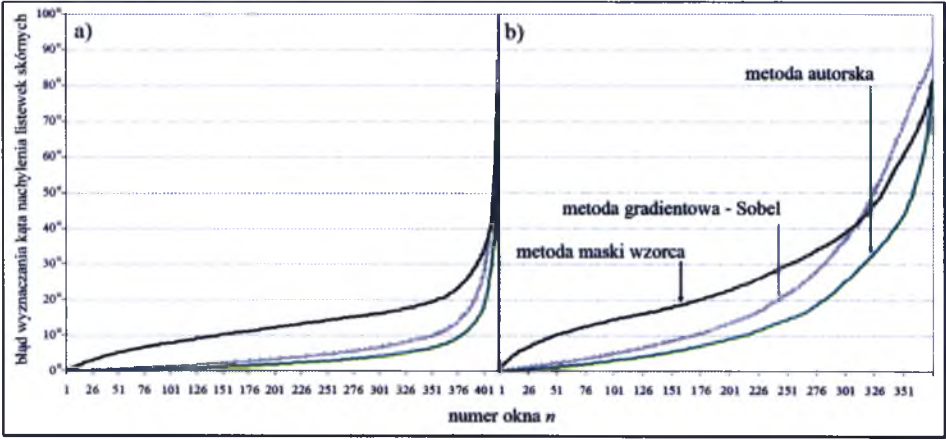
Metoda	Obrazy wysokiej jakości	Obrazy niskiej jakości
Autorska	4,03°	14,61°
Gradientowa*	6,4°	21,6°
Maski wzorców	13,52°	26,5°

* W metodzie gradientowej wykorzystano maskę Sobela.

zastosowano filtr anizotropowy, uzyskując tym samym zmniejszenie błędu wyznaczania kierunków listewek skórnych.

W filtracji anizotropowej do określania kierunków listewek wykorzystano maskę wzorca. Na metodę autorską składają się Algorytmy 1-5.

Wyznaczono również średni błąd $\bar{\theta}^e$ dla obrazów pochodzących z bazy FVC, dla których została określona informacja o jakości obrazów. Wyniki przedstawiono w Tabeli 5.6.



Rysunek 5.17: Krzywe błędów wyznaczania kąta nachylenia listewek skórnych dla obrazów bazy FVC o: a) wysokiej jakości, b) niskiej jakości.

Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda autorska najdokładniej wyznacza kierunki listewek skórnych w odniesieniu do wskazań referencyjnych.

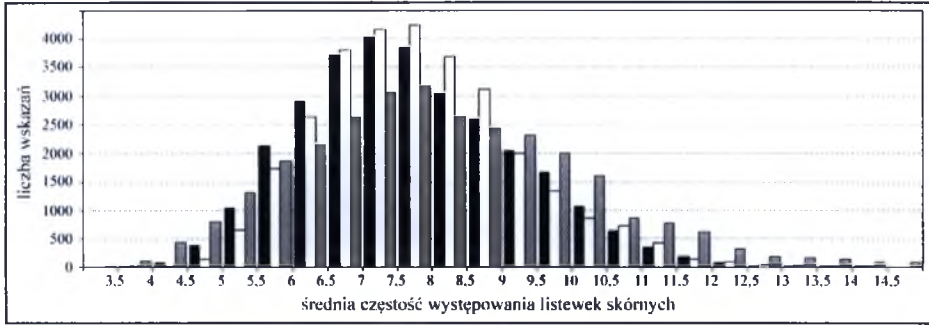
5.4.3 Badania częstości występowania listewek skórnych

Wyznaczone przez eksperta wartości częstości występowania listewek skórnych (Rozdział 5.4.1) porównane zostały z wartościami wyznaczonymi metodami au-

tomatycznymi: metodą opisaną w Rozdziale 4.5 (Algorytm 6) oraz metodą widmową opisaną w literaturze [130]. Wybór metody widmowej, gdzie zastosowano transformację Fouriera, podyktowany był dobrymi wynikami, co umożliwia stosowanie algorytmu w metodach poprawy jakości. Przedstawione w pracy [130] eksperymenty przeprowadzono jednak tylko dla 30 obrazów.

Porównywane wartości wyznaczane były automatycznie w oknach n o rozmiarach 64×64 (Rys. 5.13), w których ekspert daktyloskopii dokonał ręcznego pomiaru odległości pomiędzy czterema listewkami skórnymi.

Rozkład częstości występowania listewek skórných dla różnych metod przedstawia wykres na Rys. 5.18.



Rysunek 5.18: Rozkład średniej częstości występowania listewek skórných na różnych obrazach O_i : kolor czarny - ekspert daktyloskopii, kolor biały - metoda autorska (Rozdział 4.5), kolor szary - metoda widmowa [130].

Wartość błędu wyznaczania częstości występowania listewek skórných względem wskazań eksperta wyznaczona została na podstawie zależności:

- Średni błąd w procentach:

$$\bar{f}^P = \frac{1}{\sum_{i=1}^{1060} nv_i} \sum_{i=1}^{1060} \sum_{j=1}^{nv_i} \frac{100 \cdot f_{ij}^{|\varepsilon|}}{f_i^E j} \quad (5.10)$$

- Średni błąd w pikselach:

$$\bar{f}^D = \frac{1}{\sum_{i=1}^{1060} nv_i} \sum_{i=1}^{1060} \sum_{j=1}^{nv_i} f_{ij}^{\varepsilon} \quad (5.11)$$

gdzie:

$$f_{ij}^{\varepsilon} = f_{ij}^E - f_{ij}^A, \quad (5.12)$$

$$f_{ij}^{|\varepsilon|} = |f_{ij}^E - f_{ij}^A|, \tag{5.13}$$

f_{ij}^E - częstość występowania listewek skórnych wyznaczona przez eksperta daktyloskopii w j -tym oknie i -tego obrazu O_i ,

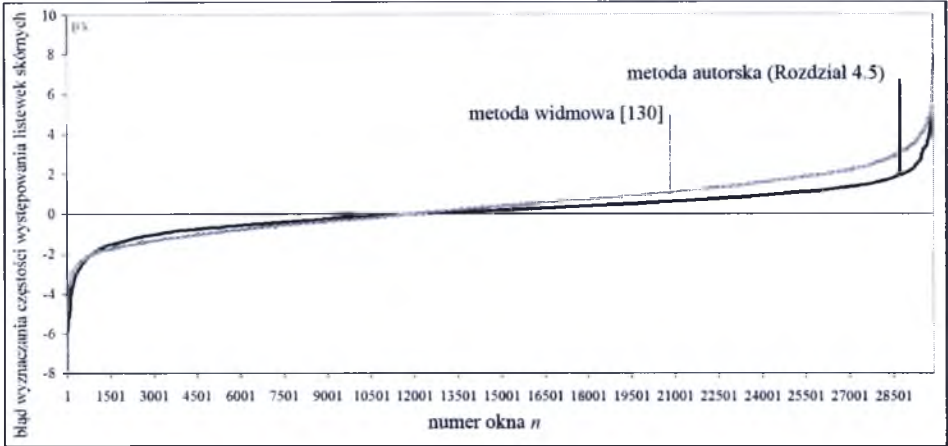
f_{ij}^A - częstość występowania listewek skórnych wyznaczona automatycznie w j -tym oknie i -tego obrazu O_i .

Opisane powyżej metody obliczania częstości występowania listewek skórnych zostały porównane ze wskazaniami eksperta daktyloskopii, dla których wyznaczono został średni błąd, przedstawiony w Tabeli 5.7.

Tabela 5.7: Błąd pomiaru częstości występowania listewek skórnych, w stosunku do pomiarów wykonanych przez eksperta daktyloskopii*.

	Metoda autorska	Metoda widmowa
Średni błąd \bar{f}^P	10,43%	15,47%
Średni błąd \bar{f}^D	0,795 px	1,163 px

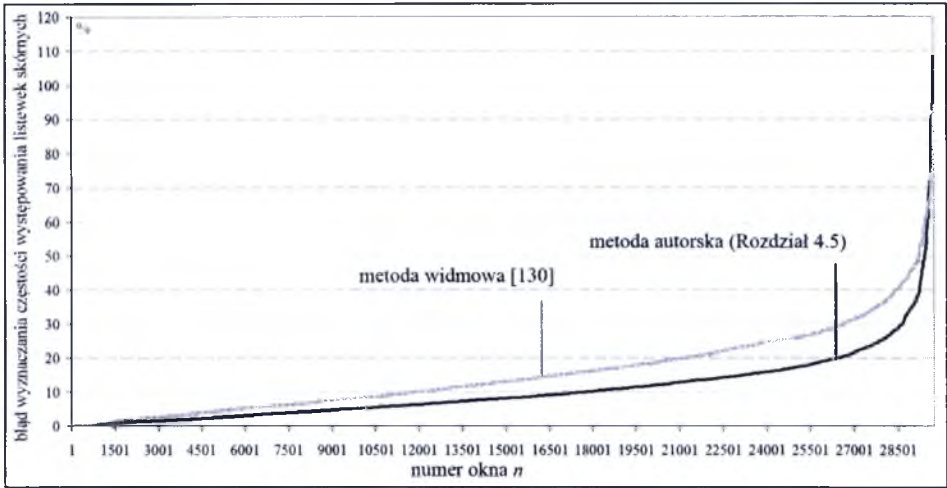
Krzywe błędu wyznaczania częstości listewek skórnych zostały przedstawione na Rys. 5.19 i 5.20.



Rysunek 5.19: Błąd f^e wyznaczania częstości listewek, względem pomiarów eksperta daktyloskopii. Błąd określony w pikselach.

Dodatkowo w celach referencyjnych wyznaczono średni błąd \bar{f}^P uzyskany dla obrazów bazy FVC oznaczonych jako obrazy o złej oraz wysokiej jakości. Wyniki przedstawiono w Tabeli 5.8.

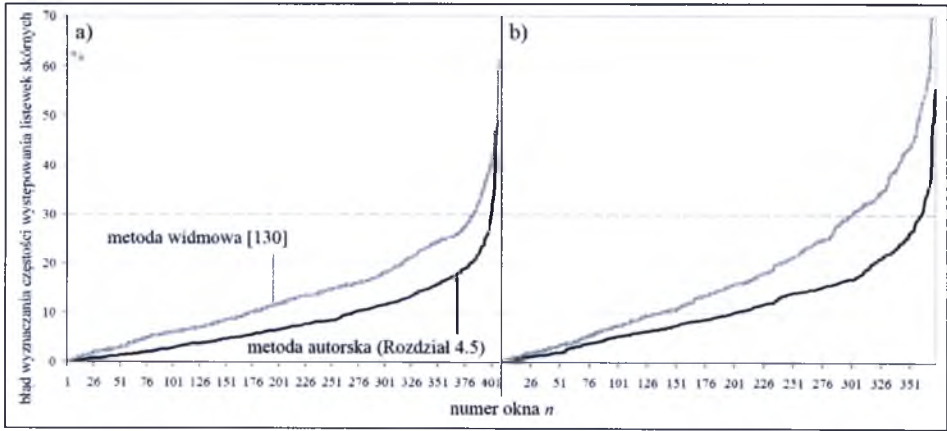
Krzywe wyznaczonych błędów zostały przedstawione na Rys. 5.21.



Rysunek 5.20: Błąd $f^{|\varepsilon|}$ wyznaczania częstości listewek, względem pomiarów eksperta daktyloskopii. Błąd określony w procentach.

Tabela 5.8: Średni błąd \bar{f}^P wyznaczania częstości występowania listewek skórnych względem pomiarów wykonanych przez eksperta daktyloskopii.

	Metoda autorska	Metoda widmowa
Obrazy wysokiej jakości	8,5%	13,5%
Obrazy niskiej jakości	11,14%	18,04%



Rysunek 5.21: Błąd $f^{|\varepsilon|}$ wyznaczania częstości listewek, względem pomiarów eksperta daktyloskopii. Błąd określony w procentach.

Z przeprowadzonych badań wynika, że metoda autorska najdokładniej wyznacza częstość występowania listewek skórnych, w odniesieniu do wskazań referencyjnych.

Rozdział 6

Podsumowanie

Podstawowym celem rozprawy było opracowanie metody analizy obrazów śladów kryminalistycznych z wykorzystaniem poprawy jakości. Dotychczasowe metody poprawy jakości bazują na znajomości nachylenia oraz częstość występowania listewek skórnych. Metody analizy cech oraz poprawy jakości są więc silnie zależne od dokładności wyznaczenia tych parametrów.

Obecnie wykorzystywane metody poprawy jakości, wymagają obrazów o wstępie ustalonej charakterystyce (np. jednolite tło obrazu, typ urządzenia skanującego, wymagana obecność terminu wewnętrznego na analizowanym obrazie). Wymienione restrykcje ograniczają możliwości praktycznych zastosowań, głównie do systemów komercyjnych, gdzie wszystkie parametry obrazu mogą być z góry określone. Zaproponowane w rozprawie podejście pozwala na zastosowanie opisanej metody dla dowolnego typu obrazu i dowolnej metody jego akwizycji. Proponowane rozwiązanie pozwala również na analizę obrazów niepełnych (brak delt i terminu wewnętrznego), co często się zdarza w praktyce. W szczególności opracowane algorytmy poprawy jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych mogą być stosowane w policyjnych systemach AFIS, co zostało wykazane w rozprawie.

Opracowana metoda analizy obrazów linii papilarnych cechuje się mniejszą liczbą wyznaczeń fałszywych minucji (Tabela 5.2) w porównaniu ze stosowanym obecnie w polskiej Policji systemem AFIS MetaMorpho. Poprawa ta uzyskana została metodami przetwarzania obrazów (poprawa jakości rysunku linii papilarnych). Radykalne zmniejszenie błędu wykrycia minucji fałszywych pozwala z

kolei na skrócenie czasu pracy policyjnego eksperta.

Przedstawiona w rozprawie metoda poprawy jakości obrazów linii papilarnych wykorzystuje wartości obrazu kierunków oraz częstości występowania listewek skórnych. Opracowano nowe metody wyznaczania wartości wymienionych cech. Dokładność tych metod porównano z innymi metodami znanymi z literatury. Z analizy Tabel 5.5 oraz 5.7 wynika, że przedstawione metody cechuje większa dokładność.

Przyszłe prace badawcze powinny skoncentrować się na optymalizacji algorytmu eliminacji minucji fałszywych tak, aby zmniejszyć współczynniki błędów *DMR* i *EMR*.

Planuje się również prace nad metodą identyfikacji osób umożliwiającą omińnięcie restrykcji systemu MetaMorpho, co pozwoli na wyznaczenie krzywych błędów FAR i FRR porównywanych w badaniach systemów.

W ramach współpracy z Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym autor opracował również cztery programy pomocnicze (opis zamieszczony w Dodatku A). Programy te są obecnie wykorzystywane w bieżącej pracy Laboratorium i pozwalają na skrócenie czasu pracy eksperta daktyloskopii oraz laboranta pracowni wizualizacji śladów.

Praca zrealizowana w ramach grantu promotorskiego MNISW N N519 574038 pt. „Analiza i poprawa jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych”.

Metody oraz wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w publikacjach oraz materiałach liczących się konferencji międzynarodowych.

- Artykuły z listy Journal Citation Reports (tzw. Listy Filadelfijskiej):

1. Ł. Więclaw. Fingerprint directional image enhancement. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 6540:pp.185-192, 2011.
2. P. Porwik, Ł. Więclaw. A new fingerprint ridges frequency determination method. *IEICE Int. Journal Electronics Express*, 6(3):pp.154-160, Japan, 2009.
3. P. Porwik, Ł. Więclaw. A new approach to reference point location in fingerprint recognition. *IEICE Int. Journal Electronics Express*, 1(18):pp.575-581, Japan, 2004.

- Artykuły w pozostałych czasopismach:

1. Ł. Więclaw, T. Orczyk. Fingerprint ridges frequency. *IEEE 2011, Third World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, NaBIC 2011, pp.558-561, 2011.
2. Ł. Więclaw. Fingerprint Orientation Field Enhancement. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, *Computer Recognition Systems 4*, Springer-Verlag, 95:pp.33-40, 2011.
3. P. Porwik, Ł. Więclaw. The pixel alignment based algorithm for continuous orientation field estimation. *Journal of Medical Informatics & Technologies*, 15:pp.47-52, 2010.
4. P. Porwik, Ł. Więclaw, K. Tomaszewski. Metody poprawy jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych. Konferencja: *100 lat daktyloskopii na Ziemiach Polskich*, Warszawa, 2009.
5. Ł. Więclaw. A minutiae-based matching algorithms in fingerprint recognition systems. *Journal of Medical Informatics & Technologies*, 13:pp.73-77, 2009.
6. P. Porwik, Ł. Więclaw. A new efficient method of fingerprint image enhancement. *International Journal of Biometrics*, Inderscience Publisher, 1(1):pp.36-46, 2008.

7. P. Porwik, Ł. Więclaw. Fingerprint reference point detection using neighbourhood influence method. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, Springer-Verlag, 45:pp.786-793, 2007.

- Rozdziały w monografiach:

1. Ł. Więclaw. Wyznaczanie obrazu kierunków przy użyciu algorytmów gradientowych w cyfrowych obrazach linii papilarnych. *Systemy Wspomagania Decyzji 2011*, pp.309-316, 2011.
2. P. Porwik, Ł. Więclaw. Fingerprint ridges distance measurement from bitmap images. *Biometry - Special Issue*, Centrum Inżynierii Biomedycznej, Gliwice, pp.41-52, 2010.
3. Ł. Więclaw. Nowa metoda wyznaczania obrazu kierunków linii papilarnych. *Systemy Wspomagania Decyzji 2010*, pp.331-336, 2010.
4. Ł. Więclaw. Metoda wyznaczania częstotliwości występowania listewek skórnych na obrazach linii papilarnych. *Systemy Wspomagania Decyzji 2009*, 2009.
5. P. Porwik, Ł. Więclaw. Local binarization and fingerprint area extraction in recognition systems. *Biometrics*, Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa, pp.97-106, 2008.
6. Ł. Więclaw. Metoda porównywania struktury minucji w oparciu o punkt referencyjny. *Systemy Wspomagania Decyzji 2008*, 2008.

Bibliografia

- [1] *Wielka encyklopedia PWN*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001-2005.
[cytowanie na str. 7]
- [2] *Biometrics Market and Industry Report 2009-2014*. International Biometric Group, New York, 2009. [cytowanie na str. 3]
- [3] *Global Biometrics Technology Market (2010-2015) - Market Forecast by Products, End-User Application and Geography*. MarketReportsOnline, 2011.
[cytowanie na str. 2]
- [4] F.A. Afsar, M. Arif, and M. Hussain. An effective approach to fingerprint segmentation using fisher basis. *in Proceedings of the 9th International Multi Topic Conference*, 05:pp.1–6, 2005. [cytowanie na str. 31]
- [5] M.U. Akram, S. Nasir, A. Tariq, I. Zafar, and W.S. Khan. Improved fingerprint image segmentation using newmodified gradient based technique. *in Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 08:pp.1967–1972, 2008. [cytowanie na str. 31]
- [6] F. Alonso-Fernandez, J. Fierrez-Aguilar, and J. Ortega-Garcia. An enhanced gabor filter-based segmentation algorithm for fingerprint recognition systems. *In Proceedings of the 4th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2005)*, pages 239–244, 2005. [cytowanie na str. 30, 31, 32]
- [7] Data format for the interchange of fingerprint information American national standard for information systems. *Doc#ANSI/NIST-CSL 1-1993*. American National Standards Institute, 1993. [cytowanie na str. 15]
- [8] A. Baig, A. Bouridane, and F. Kurugollu. A corner strength based fingerprint segmentation algorithm with dynamic thresholding. *Pattern Recognition*, ICPR 2008:pp.1–4, 2008. [cytowanie na str. 31]

- [9] K. Baniuk. Identyfikacja zdeformowanego śladu linii papilarnych. *Problemy Kryminalistyki*, (97-98), 1972. [cytowanie na str. 11]
- [10] O. Baruch. Line thinning by line following. *Pattern Recognition Letters*, 8(4):pp.271–276, 1988. [cytowanie na str. 34]
- [11] A.M. Bazen and S.H. Gerez. Directional field computation for fingerprints based on the principal component analysis of local gradients. *ProRISC20091 - 11th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing*, 2000. [cytowanie na str. 31]
- [12] A.M. Bazen and S.H. Gerez. Segmentation of fingerprint images. *ProRISC2001 - 12th Annual Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing*, pages 276–289, 2001. [cytowanie na str. 31, 32]
- [13] A.M. Bazen and S.H. Gerez. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7):pp.905–919, 2002. [cytowanie na str. 19, 28, 45]
- [14] A.M. Bazen and S.H. Gerez. Fingerprint matching by thin-plate spline modeling of elastic deformations. *Pattern Recognition*, 36(8):pp.1859–1867, 2003. [cytowanie na str. 19]
- [15] A.M. Bazen, M. Van Otterlo, and M. Poel. Areinforcement learning agent for minutiae extraction from fingerprints. *13th Belgian-Dutch Conference on Artificial Intelligence*, 13:pp.329–336, 2001. [cytowanie na str. 34]
- [16] A. Bertillon. *Signaletic instructions including the theory and practice of anthropometrical identification*. National Library of Medicine, Chicago, 1896. [cytowanie na str. 2, 7]
- [17] E. Blotta and E. Moler. Fingerprint image enhancement by differential hysteresis processing. *Forensic Science International*, 141:pp.109–113, 2004. [cytowanie na str. 33]
- [18] J.E. Bresenham. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4(1), 1965. [cytowanie na str. 53]
- [19] K. Byung-Gyu, K. Han-Ju, and P. Dong-Jo. New enhancement algorithm for fingerprint images. *Proceeding ICPR '02*, 3:pp.30879, 2002. [cytowanie na str. 27]
- [20] Arcelli C. and Baja G.S. A width independent fast thinning algorithm. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(7):pp.463–474, 1984. [cytowanie na str. 34]
- [21] J. Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6):pp.679–698, 1986. [cytowanie na str. 90]

- [22] R. Cappelli, D. Maio, J.L. Wayman, and A.K. Jain. Performance evaluation of fingerprint verification systems. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(1):pp.3–18, 2006. [cytowanie na str. 19]
- [23] C. Champod. Edmond locard - numerical standards & probable identifications. *Journal of Forensic Identification*, 45(2):pp.136–163, 1995. [cytowanie na str. 12, 78]
- [24] Y.H. Chan and S.A.R. Abu-Bakar. Fingerprint center point location using directional field. *Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics (ICIG'04)*, pages 286–289, 2004. [cytowanie na str. 19]
- [25] X. Chen, J. Tian, J. Cheng, and X. Yang. Segmentation of fingerprint images using linear classifier. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004(4):pp.480–494, 2004. [cytowanie na str. 31]
- [26] B.H. Cho, J.S. Kim, J.H. Bae, I.G. Bae, and K.Y. Yoo. Core-based fingerprint image classification. *International Conference on Pattern Recognition (15th)*, 2:pp.863–866, 2000. [cytowanie na str. 27]
- [27] Inc. Cross Match Technologies. Verifier 300 lc. <http://www.crossmatch.com/verifier-300-lc-2.php>. [cytowanie na str. 75]
- [28] S.C. Dass. Markov random field models for directional field and singularity extraction in fingerprint images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(10):pp.1358–1367, 2004. [cytowanie na str. 19]
- [29] J.G. Daugman. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters. *Journal of the Optical Society of America*, 2(7):pp.1160–1169, 1985. [cytowanie na str. 33]
- [30] M.J. Donahue and S.I. Rokhlin. On the use of level curves in image analysis. *Image Understanding*, 57(2):pp.185–203, 1993. [cytowanie na str. 28]
- [31] E.R. Dougherty. *Introduction to Morphological Image Processing*. SPIE-International Society for Optical Engine, 1992. [cytowanie na str. 58]
- [32] G.A. Drets and H.G. Liljenstroem. Fingerprint subclassification: A neural network approach. *Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition*, pages 109–134, 1999. [cytowanie na str. 28]
- [33] D. Eberly. Fast gaussian blur, geometric tools. <http://www.geometrictools.com/>, 2008. [cytowanie na str. 42]
- [34] H. Faulds. *Guide to Finger-Print Identification*. Hanley: Wood, Mitchell & Co Ltd., London, 1905. [cytowanie na str. 11]
- [35] M. Fido and K. Skinner. *The Official Encyclopedia of Scotland Yard*. Virgin Books, London, 1999. [cytowanie na str. 8]

- [36] H. Fronthaler, K. Kollreider, and J. Bigün. Local features for enhancement and minutiae extraction in fingerprints. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(3):pp.354–363, 2008. [cytowanie na str. 34]
- [37] FVC. Fingerprint verification algorithms. <https://biolab.csr.unibo.it/FVCOnGoing>. [cytowanie na str. 74]
- [38] F.M. Galton. *Finger Prints*. Macmillan and Co, London, 1892. [cytowanie na str. 11, 12]
- [39] R. Gonzalez and R. Woods. *Digital Image Processing*. Addison Wesley, 1992. [cytowanie na str. 47, 90]
- [40] S. Greenberg, M. Aladjem, D. Kogan, and I. Dimitrov. Fingerprint image enhancement using filtering techniques, pattern recognition. 3:pp.322–325, 2000. [cytowanie na str. 27, 28, 32]
- [41] Cz. Grzeszyk. Badania nad minucjami linii papilarnych. *Problemy Kryminalistyki*, (96), 1972. [cytowanie na str. 13]
- [42] Cz. Grzeszyk. Uściślenie kryteriów warunkujących wydanie opinii katagorycznej w kryminalistycznej ekspertyzie daktyloskopiowej. *Zeszyty Naukowe ASW*, (21), 1978. [cytowanie na str. 11]
- [43] Cz. Grzeszyk. *Daktyloskopia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1992. [cytowanie na str. 11]
- [44] J. Gu, Zhou. J, and D. Zhang. A combination model for orientation field of fingerprints. *Pattern Recognition*, 37(3):pp.543–553, 2004. [cytowanie na str. 29]
- [45] U. Halici and G. Ongun. Fingerprint classification through self-organizing feature maps modified to treat uncertainties. *Proceedings of the IEEE*, 84(10):pp.1497–1512, 1996. [cytowanie na str. 28]
- [46] T. Hanausek. *Kryminalistyka - zarys wykładu*. Wolters Kluwer Polska, 2009. wydanie 6 uaktualnione. [cytowanie na str. 7]
- [47] Y. He, X. Luo, and T. Zhang. Image enhancement and minutiae matching in fingerprint verification. *Pattern Recognition Letters*, 24(9-10):pp.1349–1360, 2003. [cytowanie na str. 78]
- [48] E. Henry. *The Classification and Uses of Finger Prints*. Scotland Yard Criminal Investigation Division, London, 1898. [cytowanie na str. 8, 12]
- [49] E. Henry. *Classification and Uses of Finger Prints*. Routledge, London, 1900. [cytowanie na str. 29]
- [50] W. J. Herschel. Skin furrows of the hand. *Nature*, Vol. 23(Issue 578):pp. 76, 11 1880. [cytowanie na str. 2, 7]

- [51] L. Hong, A. Jain, S. Pankanti, and Bolle R. Fingerprint enhancement. *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, pages 202–207, 1996. [cytowanie na str. 4, 28, 30]
- [52] L. Hong, Y. Wan, and A. Jain. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(8):pp.777–789, 1998. [cytowanie na str. 4, 19, 24, 27, 28, 30, 33, 37, 43]
- [53] D.C. Douglas Hung. Enhancement and feature purification of fingerprint images. *Pattern Recognition*, 26(11):pp.1661–1671, 1993. [cytowanie na str. 30]
- [54] M. Goc i J. Moszczyński. *Ślady kryminalistyczne. Ujawnianie, zabezpieczanie, wykorzystanie*. DIFIN, 2007. [cytowanie na str. 3]
- [55] Information technology. Biometric data interchange formats. Finger minutiae data. *ISO/IEC 19794-2:2005*, 2005. [cytowanie na str. 15]
- [56] NIST American National Standards Institute. Biometric special databases and software. <http://www.nist.gov>. [cytowanie na str. 75]
- [57] A. Jain, P. Flynn, and A. Ross. *Handbook of biometrics*. Springer-Verlag, New York, 2007. [cytowanie na str. 3, 10, 67]
- [58] A. Jain, D. Maltoni, D. Maio, and S. Prabhakar. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer Professional Computing. Springer Verlag, New York, 2nd edition, 2009. [cytowanie na str. 3, 4, 21, 27, 33, 34, 78, 79, 80, 87]
- [59] A.K. Jain, L. Hong, S. Pankanti, and R. Bolle. An identity-authentication system using fingerprints. *IEEE Proceedings*, 85(9):pp.1365–1388, 1997. [cytowanie na str. 29]
- [60] A.K. Jain, S. Pankanti, and L. Hong. A multichannel approach to fingerprint classification. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21:pp.348–359, 1999. [cytowanie na str. 19, 27, 28, 30]
- [61] A.K. Jain, S. Prabhakar, and S.L. Hong. Fingercodex: A filterbank for fingerprint representation and matching. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, pages pp.2187–2187, 1999. [cytowanie na str. 27, 87]
- [62] A.K. Jain and N.K. Ratha. Object detection using gabor filters. *Pattern Recognition*, 30(2):pp.295–309, 1997. [cytowanie na str. 31, 32, 33]
- [63] R. Jayadevan, V. Kulkarni Jayant, N. Mali Suresh, and K. Abhyankar Hemant. A new ridge orientation based method of computation for feature extraction from fingerprint images. *Transactions on Engineering, Computing and Technology*, 13:pp.201–206, 2006. [cytowanie na str. 27]
- [64] B. Jähne, R. Mester, E. Barth, and H. Scharr. Optimal filters for extended optical flow. *IWCM 2004. LNCS*, 3417:pp.14–29, 2007. [cytowanie na str. 47, 90]

- [65] X. Jiang, W.Y. Yau, and W. Ser. Detecting the fingerprint minutiae by adaptive tracing the gray-level ridge. *Pattern Recognition*, 34(5):pp.999–1013, 2001. [cytowanie na str. 34]
- [66] B. Jin, H.P. Tang, and M.L. Xu. Fingerprint singular point detection algorithm by poincaré index. *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, 7(12):pp.1453–1462, 2008. [cytowanie na str. 38, 90]
- [67] A. Julasayvake and S. Choomchuay. An algorithm for fingerprint core point detection. *Proceedings of the International Symposium on Signal Processing and its Applications 2007 (ISSPA-2007)*, United Arab Emirates, 2007. [cytowanie na str. 27]
- [68] N. Kanopoulos, N. Vasanthavada, and R.L. Baker. Design of an image edge detection filter using the sobel operator. *IEEE Solid State Circuits*, 23(2):pp.358–367, 1988. [cytowanie na str. 47, 90]
- [69] K. Karu and A.K. Jain. Fingerprint classification. *Pattern Recognition*, 29(3):pp.389–404, 1996. [cytowanie na str. 28]
- [70] M. Kass and A. Witkin. Analyzing oriented patterns. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 37(3):pp.362–385, 1987. [cytowanie na str. 29, 33, 38, 45, 46, 74, 87, 90]
- [71] B.G. Kim and D.J. Park. Adaptive image normalisation based on block processing for enhancement of fingerprint image. *Electronics Letters*, 38(14):pp.696–697, 2002. [cytowanie na str. 27, 28]
- [72] P. Komarinski. *Automated Fingerprint Identification Systems (AFIS)*. MA: Elsevier Academic Press, Burlington, 2005. [cytowanie na str. 14]
- [73] N. Koren. Image quality measurement: real world challenges. Imatest LLC, Boulder, Colorado, www.imatest.com, 2006. [cytowanie na str. 73]
- [74] Z.M. Kovacs-Vajna. A fingerprint verification system based on triangular matching and dynamic time warping. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):pp.1266–1276, 2000. [cytowanie na str. 27, 28]
- [75] Z.M. Kovacs-Vajna, R. Rovatti, and M. Frazzoni. Fingerprint ridge distance computation methodologies. *Pattern Recognition*, 33(1):pp.69–80, 2000. [cytowanie na str. 30, 31]
- [76] J.V. Kulkarni, B.D. Patil, and R.S. Holambe. Orientation feature for fingerprint matching. *Pattern Recognition*, 39(8):pp.1551–1554, 2006. [cytowanie na str. 19]
- [77] M. Kwagoe and A. Tojo. Fingerprint pattern classification. *Pattern Recognition*, 17(3):pp.295–303, 1984. [cytowanie na str. 19, 28, 76]

- [78] M.S. Landy, Y. Cohen, and G. Sperling. A unix-based image processing system. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 25(3):pp.331–347, 1984. [cytowanie na str. 34]
- [79] M.T. Leung, W.E. Engeler, and P. Frank. Fingerprint image processing using neural networks. In *TENCON 90, IEEE Region 10 Conference on Computer and Communication Systems*, 2:pp.582–586, 1990. [cytowanie na str. 34]
- [80] T. Lindeberg. *Scale Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1994. [cytowanie na str. 28]
- [81] J. Liu, Z. Huang, and K.L. Chant. Direct minutiae extraction from gray-level fingerprint image by relationship examination. In *International Conference on Image Processing*, 2:pp.427–430, 2000. [cytowanie na str. 34]
- [82] E. Locard. *Traité de Criminalistique*. J. Desvigne et ses fils, Lyon, 1931. [cytowanie na str. 11]
- [83] D. Maio and D. Maltoni. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(1):pp.27–40, 1997. [cytowanie na str. 29, 33, 34]
- [84] D. Maio and D. Maltoni. Ridge-line density estimation in digital images. *14th International Conference on Pattern Recognition*, 1:pp.534–538, 1998. [cytowanie na str. 30]
- [85] P.B. Marques and G. Thom 'e. A neural network fingerprint segmentation method. *Proceedings of the 5th International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, 05:pp.385–392, 2005. [cytowanie na str. 31]
- [86] B.M. Mehtre and B. Chatterjee. Segmentation of fingerprint images - a composite method. *Pattern Recognition*, 20(4):pp.381–385, 1989. [cytowanie na str. 31, 34]
- [87] B.M. Mehtre, N.N. Murthy, and S. Kapoor. Segmentation of fingerprint images using the directional image. *Pattern Recognition*, 20(4):pp.429–435, 1987. [cytowanie na str. 19, 31]
- [88] B. Moayer and K.S. Fu. A tree system approach for fingerprint pattern recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Analysis*, 8(3):pp.376–387, 1986. [cytowanie na str. 34]
- [89] M.U. Munir and M.Y. Javed. Fingerprint matching using gabor filters. *National Conference on Emerging Technologies NCET*, 2004. [cytowanie na str. 27]
- [90] Computer Systems Department University of Silesia. Biometric research centre. <http://www.biometrics.us.edu.pl/resources/downloads>. [cytowanie na str. 75, 76]

- [91] L. O’Gorman and J.V. Nickerson. An approach to fingerprint filter design. *Pattern Recognition*, 22(1):pp.29–38, 1989. [cytowanie na str. 28, 30, 32]
- [92] R. Olsen. A fingerprint fable: The will and william west case. *Journal of Forensic Identification*, Vol. 37(No. 11), 1987. [cytowanie na str. 3, 7]
- [93] C.H. Parka and J.J. Leeb. Singular point detection by shape analysis of directional fields in fingerprints. *Pattern Recognition*, 39(5):pp.839–855, 2006. [cytowanie na str. 19]
- [94] T. Pavlidis. *Algorithms for Graphics and Image Processing*. Computer Science Press, Maryland, 1982. [cytowanie na str. 64]
- [95] P. Perona. Orientation diffusions. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(3):pp.457–467, 1998. [cytowanie na str. 29]
- [96] S. Prabhakar. *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, 2001. [cytowanie na str. 11]
- [97] S. Prabhakar, A.K. Jain, and S. Pankanti. Learning fingerprint minutiae location and type. *Pattern Recognition*, 36(8):pp.1847–1857, 2003. [cytowanie na str. 34]
- [98] J.M.S. Prewitt. Object enhancement and extraction. in *Picture Processing and Psychopictorics*, Academic Press, 1970. [cytowanie na str. 47, 90]
- [99] J. Qi, S. Yang, and Y. Wang. Fingerprint matching combining the global orientation field with minutia. *Pattern Recognition Letters*, 26(15):pp.2424–2430, 2005. [cytowanie na str. 19]
- [100] A.R. Rao and R.C. Jain. Computerized flow field analysis: Oriented texture fields. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(7):pp.693–709, 1992. [cytowanie na str. 29]
- [101] K. Rao and K. Black. Type classification of fingerprints: a syntactic approach. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2(3):pp.223–231, 1980. [cytowanie na str. 19]
- [102] N. Ratha, S. Chen, and A.K. Jain. Adaptive flow orientation based feature extraction in fingerprint images. *Pattern Recognition*, 28:pp.1657–1672, 1995. [cytowanie na str. 29, 31, 34]
- [103] B. Ruud, J.H. Connell, S. Pankanti, N.K. Ratha, and A.W. Senior. *Guide to Biometrics*. Springer Verlag, 2003. [cytowanie na str. 19]
- [104] V.K. Sagar, D.B.L. Ngo, and K.C.K. Foo. Fuzzy feature selection for fingerprint identification. In *Security Technology, Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers 29th Annual 1995 International Carnahan Conference*, pages 85–90, 1995. [cytowanie na str. 34]

- [105] J. Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, Inc., Orlando, 1983. [cytowanie na str. 58]
- [106] B.G. Sherlock and D.M. Monro. A model for interpreting fingerprint topology. *Pattern recognition*, 26(7):pp.1047–1055, 1993. [cytowanie na str. 29]
- [107] B.G. Sherlock, D.M. Monro, and K. Millard. Fingerprint enhancement by directional fourier filtering. In *Visual Image Signal Processing*, 141:pp.87–94, 1994. [cytowanie na str. 28, 33]
- [108] Z.C. Shi, Y.S. Wang, J. Qi, and K. Xu. A new segmentation algorithm for low quality fingerprint image. in *Proceedings of the 3rd International Conference on Image and Graphics*, 04:pp.314–319, 2004. [cytowanie na str. 31]
- [109] P. Soille. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. Springer-Verlag New York, Secaucus, 2003. [cytowanie na str. 58]
- [110] D.A. Stoney. Distribution of epidermal ridge minutiae. *American Journal of Physical Anthropology*, 77:pp.367–376, 1988. [cytowanie na str. 12]
- [111] T. Szczepański. Chemical imaging jako nowa zaawansowana technika rejestracji śladów daktyloskopijnych. *Problemy Kryminalistyki*, (262):pp.51–58, 2008. [cytowanie na str. 4]
- [112] E. Tabassi and C.L. Wilson. A new approach to fingerprint image quality. *IEEE proceedings of International Conference on Image Processing*, 2:pp.37–40, 2005. [cytowanie na str. 30]
- [113] A.M. Tahmasebi and S. Kasaei. A novel adaptive approach to fingerprint enhancement filter design. *Signal Processing: Image Communication*, 17(10):pp.849–855, 2002. [cytowanie na str. 4, 28]
- [114] H. Tamura. A comparison of line thinning algorithms from digital topology viewpoint. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, 4:pp.715–719, 1978. [cytowanie na str. 34]
- [115] C. Vinodh. Extracting and enhancing the core area in fingerprint images. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(11):pp.16–20, 2007. [cytowanie na str. 19, 33]
- [116] P.R. Vizcaya and L.A. Gerhardt. A nonlinear orientation model for global description of fingerprints. *Pattern Recognition*, 29(7):pp.1221–1231, 1996. [cytowanie na str. 29]
- [117] L. Wang, M. Dai, and G.H. Geng. Fingerprint image segmentation by energy of gaussian-hermite moments. in *Proceedings of the 5th Chinese Conference on Biometric Recognition, Advances in Biometric Person Authentication*, 3338:pp.414–423, 2004. [cytowanie na str. 31]

- [118] S. Wang, W.W. Zhang, and Y.S. Wang. Fingerprint classification by directional fields. *Proceedings of Fourth IEEE International Conference on Multimodal Interfaces*, pages 395–399, 2002. [cytowanie na str. 19]
- [119] W. Wang, J. Li, F. Huang, and H. Feng. Design and implementation of log-gabor filter in fingerprint image enhancement. *Pattern Recognition Letters*, 29(3):pp.301–308, 2008. [cytowanie na str. 19, 33]
- [120] C.L. Wilson, G.T. Candela, and C.I. Watson. Neural network fingerprint classification. *Artificial Neural Networks*, 1(2):pp.203–228, 1994. [cytowanie na str. 28]
- [121] C.H. Wu, S. Tulyakov, and V. Govindaraju. Image quality measures for fingerprint image enhancement. *Proceedings of the 2006 international conference on Multimedia Content Representation*, MRCS 06:pp.215–222, 2006. [cytowanie na str. 45]
- [122] C.H. Wu, S. Tulyakov, and V. Govindaraju. Robust pointbased feature fingerprint segmentation algorithm. *Proceedings of the International Conference on Advances in Biometrics*, 4642:pp.1095–1103, 2007. [cytowanie na str. 31]
- [123] Q. Xiao and H. Raafat. Combining statistical and structural information for fingerprint image processing classification and identification. *World Scientific*, pages 335–354, 1991. [cytowanie na str. 34]
- [124] A. B. Xuefeng Liang and T. Asano. A near-linear time algorithm for binarization of fingerprint images using distance transform. *Combinatorial Image Analysis*, pages 197–208, 2004. [cytowanie na str. 19]
- [125] N. Yager and A. Amin. Fingerprint alignment using a two stage optimization. *Pattern Recognition Letters*, 27(5):pp.317–324, 2006. [cytowanie na str. 19]
- [126] G.Z. Yang, P. Burger, D.N. Firmin, and S.R. Underwood. Structure adaptive anisotropic image filtering. *Image and Vision Computing*, 14:pp.135–145, 1996. [cytowanie na str. 32]
- [127] J. Yang, L. Liu, T. Jiang, and Y. Fan. A modified gabor filter design method for fingerprint image enhancement. *Pattern Recognition Letter*, 24:pp.1805–1817, 2003. [cytowanie na str. 33]
- [128] M. Yazdi, Z. Adelpour, B. Bahraini, and Y.K. Jahromi. Novel ridge orientation based approach for fingerprint identification using co-occurrence matrix. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 26:pp.371–375, 2007. [cytowanie na str. 27]
- [129] J.P. Yin, E. Zhu, X.J. Yang, G.M. Zhang, and C.F. Hu. Two steps for fingerprint segmentation. *Image and Vision Computing*, 25(9):pp.1391–1403, 2007. [cytowanie na str. 31]

- [130] Y. Yin, J. Tian, and X. Yang. Ridge distance estimation in fingerprint images: Algorithm and performance evaluation. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2004(4):pp.495–502, 2004. [cytowanie na str. 30, 31, 74, 87, 94]
- [131] Y.L. Yin, Y.R. Wang, and X.K. Yang. Fingerprint image segmentation based on quadric surface model. in *Proceedings of Audio- and Video Based Biometric Person Authentication*, 3546:pp.647–655, 2005. [cytowanie na str. 31]
- [132] Z. Yuheng and X. Qinghan. An optimized approach for fingerprint binarization. In *International Joint Conference on Neural Networks*, pages 391–395, 2006. [cytowanie na str. 28]
- [133] E.K. Yun and S.B. Cho. Adaptive fingerprint image enhancement with fingerprint image quality analysis. *Image and Vision Computing*, 24(1):pp.101–110, 2006. [cytowanie na str. 4, 28]
- [134] S. Zhongchao, W. Yangsheng, Q. Jin, and X. Ke. A new segmentation algorithm for low quality fingerprint images. *Proceedings of the Third International Conference on Image and Graphics*, 04:pp.314–317, 2004. [cytowanie na str. 31]
- [135] J. Zhou and J. Gu. A model-based method for the computation of fingerprints orientation field. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(6):pp.821–35, 2004. [cytowanie na str. 28, 29]
- [136] E. Zhu, J. Yin, C. Hu, and G. Zhang. A systematic method for fingerprint ridge orientation estimation and image segmentation. *Pattern Recognition*, 39(8):pp.1452–1472, 2006. [cytowanie na str. 19, 29, 31]
- [137] E. Zhu, J. Yin, C. Hu, G. Zhang, and J. Zhang. Using inter-ridge distance for fingerprint classification. *Proceedings of the International Conference on Cognition and Recognition*, pages 818–823, 2005. [cytowanie na str. 30]

Dodatek A

Wykonane oprogramowanie

Opis wykonanego oprogramowania pomocniczego, wdrożonego w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym przy Komendzie Głównej Policji w Warszawie..

Stosowany w polskiej Policji system AFIS MetaMorpho wymaga odpowiednio przygotowanego obrazu linii papilarnych. Ślady kryminalistyczne, których akwizycja wykonywana jest bezpośrednio przez służby kryminalne na miejscu przestępstwa, bądź przez laboranta wizualizacji śladów, fotografowane są w wysokiej rozdzielczości. Tak pozyskany cyfrowy obraz jest ręcznie przygotowywany, przez pracownika laboratorium wizualizacji śladów, do wprowadzenia do systemu AFIS. Wymogiem systemu jest, aby obraz był zapisany w rozdzielczości 500dpi w odcieniach szarości. Dotychczasowo, przygotowanie obrazu wykonywane było ręcznie w oprogramowaniu Adobe Photoshop. Następnie, materiał dowodowy drukowany był na tzw. *tablicy poglądowej* w celu przekazania ekspertowi daktyloskopii.

Zgodnie z obserwacjami autora, poczynionymi w trakcie badań w Centralnym Laboratorium Kryminalistycznym, opisana powyżej procedura wymaga żmudnej, czasochłonnej pracy.

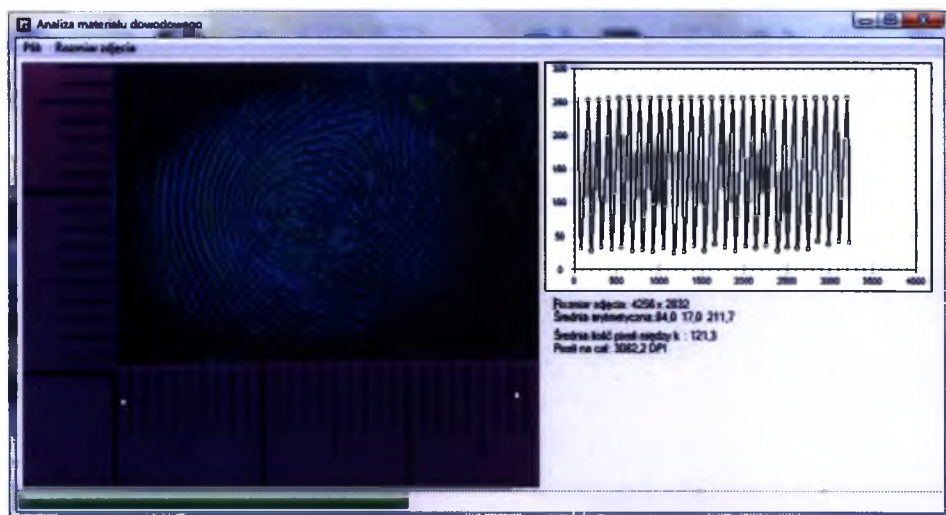
W celu skrócenia czasu pracy laboranta pracowni wizualizacji oraz eksperta daktyloskopii, autor przygotował oprogramowanie automatyzujące oraz wspomagające pracę tych osób, którego opis zamieszczono poniżej.

1. Automatyczne skalowanie cyfrowych fotografii śladów linii papilarnych.

Ślady kryminalne w postaci odcisków linii papilarnych fotografowane są w wysokiej rozdzielczości, przekraczającej 2500 dpi. Obrazy takie następnie muszą być skalowane przez laboranta pracowni wizualizacji do rozdzielczości 500dpi. Dotychczasowo wykonywane to było na podstawie ręcznych obliczeń, co umożliwiała sfotografowana wraz ze śladem skalówka (Rys. A.1). Laborant na jej podstawie wyliczał rozdzielczość obrazu, w celu wykonania operacji skalowania.

W celu zautomatyzowania pracy, wykonano oprogramowanie, które automatycznie, na podstawie skalówki wylicza pierwotną rozdzielczość obrazu oraz umożliwia automatyczne skalowanie obrazu i zapisanie go rozdzielczości 500dpi (Rys. A.1).

Oprogramowanie to powstało na bazie algorytmu wyznaczania częstotliwości listewek skórnych opisanego w Rozdziale 4.5.



Rysunek A.1: Program do automatycznego skalowania obrazów linii papilarnych na podstawie skalówki.

2. Automatyczne generowanie tablic poglądowych.

Po odpowiedniej obróbce graficznej, obrazy śladów kryminalistycznych muszą być wydrukowane na tablicy poglądowej. Tablica taka dotychczasowo wykonywana była ręcznie w oprogramowaniu Adobe Photoshop. Zgodnie z ustaleniami oprogramowanie to jest głównym narzędziem pracy laborantów

pracowni wizualizacji śladów. Z tego względu, oprogramowanie automatyzujące tworzenie tablic wykonano w postaci skryptów programu Adobe Photoshop. Pozwoliło to na skrócenie czasu przygotowywania pojedynczej tablicy z 15-20 minut do 1-2 minuty. Często zdarza się, że w ramach jednej ekspertyzy laborant musi przygotować kilkadziesiąt takich tablic. Przykładowa tablica wygenerowana w sposób automatyczny została przedstawiona na Rys. A.2.

3. Automatyczna lokalizacja minucji na obrazach linii papilarnych.

Obecnie nie jest możliwe wdrożenie opracowanych w rozprawie metod jako integralnej części systemu AFIS MetaMorpho. Jednakże, wszystkie wyniki identyfikacji z wykorzystaniem tego systemu muszą być obecnie weryfikowane przez eksperta daktyloskopii. W celu ułatwienia (przyspieszenia) procesu weryfikacji, udostępniono ekspertom daktyloskopii oprogramowanie wykorzystujące opracowaną w rozprawie metodę Rys. A.3.

Dodatkowo, wykonano program do tworzenia statystyk wykorzystania poszczególnych metod ujawniania śladów w pracowni wizualizacji (Rys. A.4). Program ten pozwolił m.in. na dobór metod wykorzystywanych przy tworzeniu testowej bazy danych.



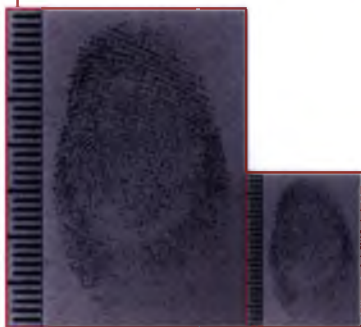
CENTRALNE LABORATORIUM KRYMINALISTYCZNE
KOMENDY GŁÓWNEJ POLICJI
WYDZIAŁ DAKTYLOSKOPII



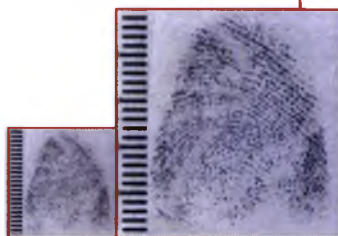
**MATERIAŁ POGLĄDOWY
DO EKSPERTYZY NR 1111111111111
(STANOWI NIEROZŁĄCZNA CZĘŚĆ OPINII)**



Fot. 1 - Materiał dowodowy w postaci metalowej obudowy wałka daktyloskopijnego ujawniony w mieszkaniu przy ul. Wojska Polskiego 10/25 w Toruniu, dnia 23.11.2008r.



Fot. 2, 3 - Odzworowanie linii papilarnych oznaczone nr 111/1/3 (rejestr 111/1/3-N1) w powiększeniu i w skali 1:1 ujawnione na metalowej obudowie oznaczonej jako ślad nr 111/1.



Fot. 4, 5 - Odzworowania linii papilarnych oznaczone nr 111/1/2 (rejestr 111/1/2-N1) w powiększeniu i w skali 1:1 ujawnione na metalowej obudowie oznaczonej jako ślad nr 111/1.

Fot. 6, 7 - Odzworowania linii papilarnych oznaczone nr 111/1/1 (rejestr 111/1/1-N1) w powiększeniu i w skali 1:1 ujawnione na metalowej obudowie oznaczonej jako ślad nr 111/1.



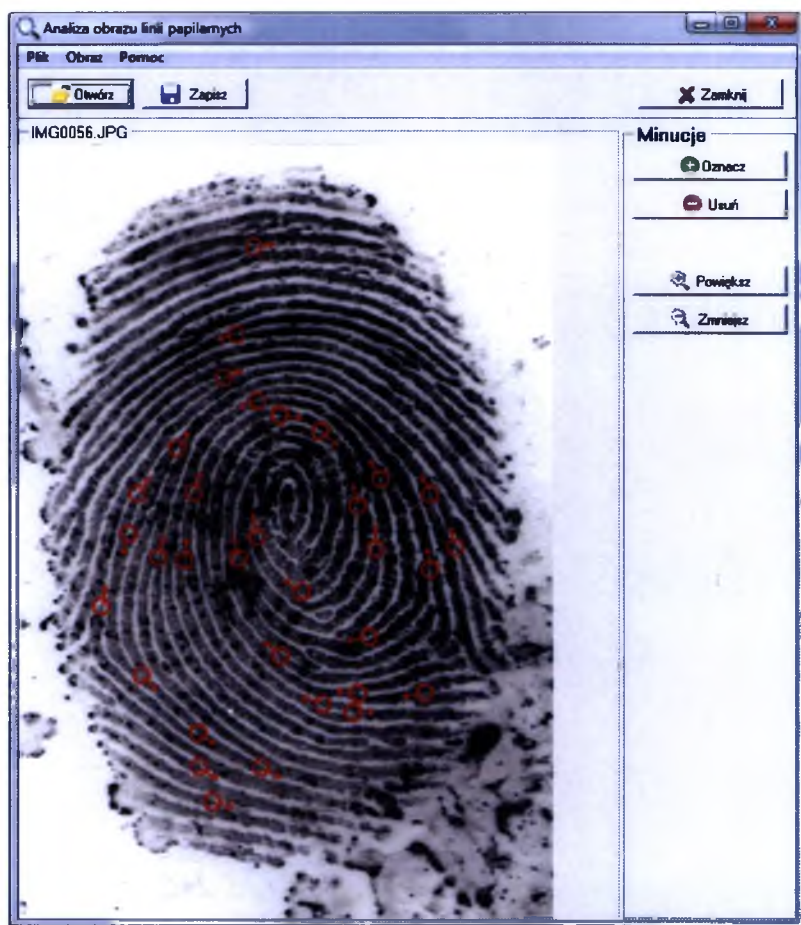
*ODWZOROWANIA LINII PAPILARNYCH ZNAJDUJĄCE SIĘ NA TABLICY ZOSTAŁY WSTĘPNE ZAKWALIFIKOWANE DO DALSZYCH BADAŃ DAKTYLOSKOPIJNYCH.

*O ICH PRZYDATNOŚCI DO IDENTYFIKACJI DECYDUJE EKSPERT WYKONUJĄCY BADAŃIA IDENTYFIKACYJNE.

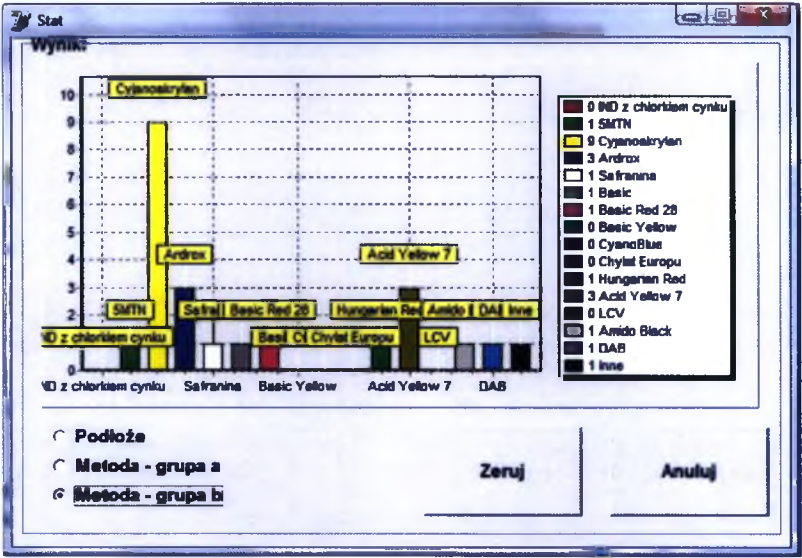
PUSTE MIEJSCE PIĘCZEC I PODPIS

str. 1

Rysunek A.2: Automatycznie wygenerowana tablica poglądowa.



Rysunek A.3: Program do automatycznej lokalizacji minucji na obrazach linii papilarnych.



Rysunek A.4: Program do tworzenia statystyk wykorzystywanych metod ujawniania śladów kryminalistycznych.

Spis symboli i skrótów

Symbol	Opis
$p(x, y)$	punkt obrazu o współrzędnych pikselowych (x, y) ;
I	obraz linii papilarnych;
$I(x, y)$	wartość piksela obrazu I w punkcie $p(x, y)$;
$N \times M$	rozmiary obrazu I , $x = 1, \dots, N$, $y = 1, \dots, M$;
m	minucja;
φ	kąt nachylenia minucji m do osi OX ;
$\theta(x, y)$	kąt nachylenia listewek skórnych w punkcie (x, y) ;
$\bar{\theta}_{ds}$	kąt θ wyznaczony metodą maski wzorców;
$\bar{\theta}$	kąt θ wyznaczony metodą autorską (Algorytmy 2-5);
$f(x, y)$	częstość występowania listewek skórnych w punkcie (x, y) ;
\bar{f}	częstość f wyznaczona metodą autorską (Algorytm 6) ;
I_{norm}	obraz linii papilarnych po normalizacji;
I_{aniz}	obraz linii papilarnych po filtracji filtrem anizotropowym;
I_{qual}	obraz linii papilarnych po binaryzacji z poprawą jakości;
I_{skel}	obraz linii papilarnych po procesie szkieletyzacji;
$Sg(x, y)$	punkty o wartości $Sg(x, y)=1$ należą do obszaru tła obrazu, a o wartości 0 do obszaru występowania listewek skórnych;
$sd(m_i, m_j)$	odległość euklidesowa pomiędzy dwoma minucjami m_i, m_j ;

Symbol	Opis
$dd(m_i, m_j)$	różnica kątów nachylenia dwóch minucji m_i, m_j względem osi OX ;
$IMG * fl$	splot dowolnego obrazu IMG z maską fl o wymiarach $a \times a$, określony wzorem A.1;

$$IMG(x, y) * fl = \sum_{u=-a/2}^{a/2} \sum_{v=-a/2}^{a/2} IMG(x + u, y + v) * fl(u + a/2, v + a/2) \quad (A.1)$$

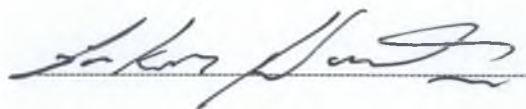
Imię i nazwisko autora rozprawy	Łukasz Więclaw
Imię i nazwisko promotora rozprawy	Piotr Porwik
Wydział / Jednostka niebędąca Wydziałem	Wydział Informatyki i Nauki o Materiałach
Dziedzina naukowa	nauki techniczne
Dyscyplina naukowa	informatyka
Tytuł pracy	Analiza i poprawa jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych

Niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie, udzielam Uniwersytetowi Śląskiemu nieodpłatnej licencji niewyłącznej do korzystania z ww. pracy bez ograniczeń czasowych, w następującym zakresie:

- rozpowszechniania pracy poprzez publiczne udostępnianie pracy w wersji drukowanej i elektronicznej, w taki sposób, aby każdy mógł mieć do niej dostęp w miejscu, w którym praca jest przechowywana tj.: w Archiwum Uniwersytetu Śląskiego lub w Bibliotece Uniwersytetu Śląskiego,
- rozpowszechniania pracy poprzez publiczne udostępnianie pracy w wersji elektronicznej w sieci Internet w domenie us.edu.pl oraz w innych serwisach internetowych, tworzonych z udziałem Uniwersytetu Śląskiego.

DATA **12.06.2012**

PODPIS AUTORA



Łukasz Więclaw

Rozprawa doktorska:

Analiza i poprawa jakości cyfrowych obrazów linii papilarnych

Słowa kluczowe:

Biometria, daktyloskopia, AFIS, linie papilarne, listewki skórne, poprawa jakości, minucje, obraz kierunków, filtracja anizotropowa, analiza obrazu